ANAEROBIC TECHNOLOGY

A Review of Research, Development and Demonstration Activity in the Agrifood and Pulp and Paper Industries

TECHNOLOGIE ANAÉROBIE

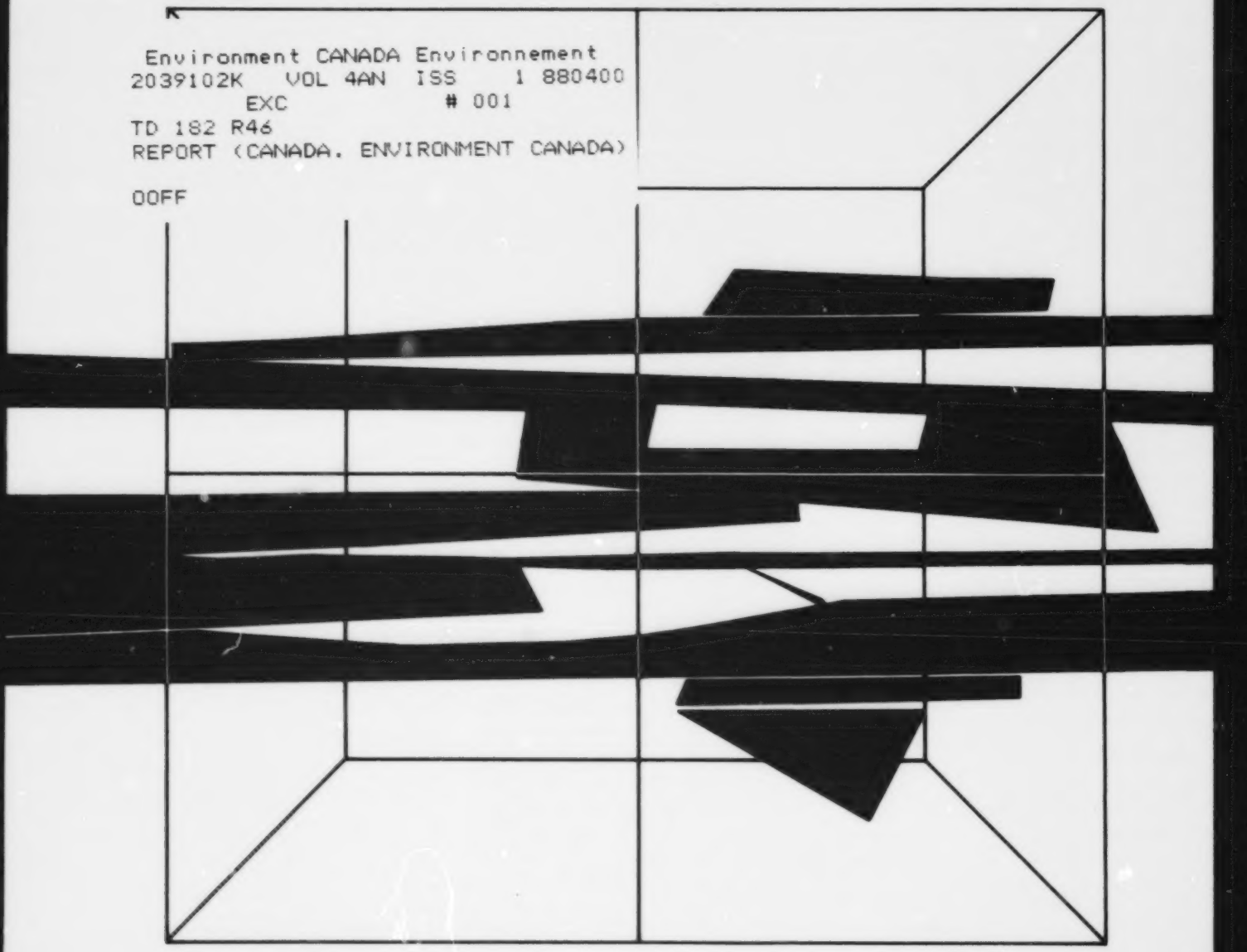
Compte rendu des activités de recherche de développement et de démonstration dans l'industrie agro-alimentaire et celle des pâtes et papiers

Report EPS 4/AN/1
April 1988

Rapport SPE 4/AN/1
Avril 1988

Environment CANADA Environnement
2039102K VOL 4AN ISS 1 880400
EXC # 001
TD 182 R46
REPORT (CANADA. ENVIRONMENT CANADA)

OOFF



Environnement Canada Environment Canada

Canada

88-04774/

ANAEROBIC TECHNOLOGY - A Review of Research, Development And Demonstration Activity In The Agrifood And Pulp And Paper Industries

by

Heather M. Brewer

for the

Renewable Resources, Extraction and Processing Division
Industrial Programs Branch
Environment Canada

Report EPS 4/AN/1
April 1988

TECHNOLOGIE ANAÉROBIE - Compte rendu des activités de recherche, de développement et de démonstration dans l'industrie agro-alimentaire et celle des pâtes et papiers

par

Heather M. Brewer

pour la

Division de l'extraction et du traitement des ressources renouvelables
Direction des programmes industriels
Environnement Canada

Rapport SPE 4/AN/1
Avril 1988

REVIEW NOTICE

This report has been reviewed by the Industrial Programs Branch, Conservation and Protection and approved for publication. Approval does not necessarily signify that the contexts reflect the views and policies of Environment Canada. Mention of trade names or commercial products does not constitute recommendation or endorsement for use.

READERS' COMMENTS

Readers who wish to comment on the context of this report should address their comments to:

J.M. Haskill
Industrial Programs Branch
Environmental Protection
Conservation and Protection
Environment Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0H3

AVIS

Le présent rapport a été examiné par la Direction des programmes industriels, Conservation et Protection, et approuvé pour publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que ce rapport reflète les opinions et les politiques d'Environnement Canada. Toute mention de marques de commerce ou de produits commerciaux ne constitue en aucun cas une recommandation ou une approbation de leur utilisation.

COMMENTAIRES

Les lecteurs qui désirent formuler des commentaires sur le présent rapport sont priés de s'adresser à:

J.M. Haskill
Direction des programmes industriels
Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

© Minister of Supply and Services Canada 1988
Cat. No. En 49-22/4-1
ISBN 0-662-55802-2
BEAUREGARD PRESS LIMITED

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988
N° de cat. En 49-22/4-1
ISBN 0-662-55802-2
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

ABSTRACT

An overview of research, development and demonstration of anaerobic technology for the Agrifood and pulp and paper industries was researched for this report. The anaerobic activities in specific sectors of these industries is outlined and a brief summary of anaerobic fundamentals is presented.

Information on effectiveness of the anaerobic process, as well as economics and energy related matters is also included.

RÉSUMÉ

Le présent compte rendu porte sur les travaux de recherche, de développement et de démonstration de techniques anaérobies pour l'industrie agro-alimentaire et celle des pâtes et papiers. On y traite des principes de base de la technologie anaérobie et de leur application dans des secteurs particuliers de ces industries.

Sont également incluses des informations sur l'efficacité du processus anaérobie ainsi que des considérations de nature économique et énergétique.

TABLE OF CONTENTS

		Page
ABSTRACT		iii
LIST OF FIGURES		vii
ACKNOWLEDGEMENTS		viii
GLOSSARY OF TERMS AND ACRONYMS		ix , xii
1	INTRODUCTION	1
2	BASIC FUNDAMENTALS OF ANAEROBIC DIGESTION	3
2.1	Historical Synopsis	3
2.2	Process Analysis	4
2.2.1	Reactor Types	8
3	AGRICULTURAL APPLICATION OF ANAEROBIC DIGESTION	19
3.1	Incentives for Development	19
3.2	Waste Characteristics	21
3.2.1	Types of Animal Wastes	21
3.2.2	Collection Methods/ Pretreatment Practices	25
3.3	Process Systems and Performance	27
3.3.1	Digester Design	27
3.3.2	Biogas Production and Quality	31
3.3.3	Biogas Storage and Utilization	36
3.3.4	Effluent Utilization	41
3.4	Economic Implications	46
3.4.1	Capital Expenditures	46
3.4.2	Energy Displacement	49
3.4.3	Effluent Value	52
4	APPLICATION OF ANAEROBIC DIGESTION IN THE FOOD PROCESSING INDUSTRIES	61
4.1	Incentives for Development	61
4.2	Waste Characteristics	63
4.2.1	Industrial Sectors	63
4.2.2	Nutrient Availability/ Pretreatment	69
4.3	Process Systems and Performance	73

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
FIGURE	vii
REMERCIEMENTS	viii
GLOSSAIRE DES TERMS ET ABRÉVIATIONS	ix , xii
INTRODUCTION	1
PRINCIPE DE BASE DE LA DIGESTION ANAÉROBIE	3
Historique	3
Analyse du processus	4
Types de digesteurs	8
APPLICATIONS AGRICOLES DE LA DIGESTION ANAÉROBIE	19
Incitatifs au développement	19
Caractéristiques des déchets	21
Types de déchets agricoles	21
Méthodes de collecte et de pré-traitement	25
Systèmes de traitement et performances	27
Conception du digesteur	27
Production et qualité du biogaz	31
Stockage et utilisation du biogaz	36
Utilisation des effluents	41
Répercussions économiques	46
Immobilisations	46
Changement de sources d'enérgie	49
Valeur des effluents	52
APPLICATIONS DE LA DIGESTION ANAÉROBIE À L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE	61
Incitatifs au développement	61
Caractéristiques des déchets	63
Secteurs industriels	63
Disponibilité en éléments nutritifs et pré-traitement	69
Systèmes de traitement et rendement	73

TABLE OF CONTENTS

TABLE DES MATIÈRES

		Page	
4.3.1	Developments at the National Research Council of Canada	73	Réalisations du Conseil national de recherche du Canada
4.3.2	Digester Design	74	Conception du digesteur
4.3.3	Biogas Production, Quality and Utilization	78	Production, qualité et utilisation du biogaz
4.3.4	Effluent Quality and Disposal	80	Qualité de l'effluent et élimination
4.4	Economic Implications	83	Conséquences
5	APPLICATION OF ANAEROBIC DIGESTION IN THE PULP AND PAPER INDUSTRIES	94	APPLICATIONS DE LA DIGESTION ANAÉROBIE À L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS
5.1	Incentives for Development	94	Incitatifs au développement
5.2	Waste Characteristics	95	Caractéristiques des déchets
5.3	Status of Developmental Activity	97	Situation actuelle du développement
5.4	Identified Research Requirements	101	Conditions de recherche

LIST OF FIGURES

Figure		Page
1	NUMBER OF FULL-SCALE ANAEROBIC TREATMENT INSTALLATIONS IN NORTH AMERICAN AGRICULTURE VERSUS TYPE OF FARM OPERATION	22

LISTE DES FIGURES

	COMPARAISON ENTRE LE NOMBRE D'INSTALLATIONS DE TRAITMENT ANAÉROBIE À GRANDE ÉCHELLE DANS L'INDUSTRIE AGRICOLE NORD-AMÉRICANE ET LE TYPE D'EXPLOITATION AGRICOLE	

ACKNOWLEDGEMENTS

The Renewable Resources Extraction and Processing Division of the Industrial Programs Branch would like to acknowledge Mr. Doug Hayes and his staff of the Bioenergy R&D Division, Energy Mines and Resources for both the moral and financial support for this project.

REMERCIEMENTS

La Division de l'extraction et du traitement des ressources renouvelables, Direction des programmes industriels, remercie M. Doug Hayes et son équipe du Bureau de recherche et développement énergétiques pour leur aide et le financement de ce projet.

GLOSSARY OF TERMS AND ACRONYMS

Acetogenic Bacteria	-	bacteria responsible for the conversion of organic compounds to acetic acid and other intermediate volatile acids in the process of anaerobic digestion
Aerobic	-	pertaining to or in the presence of oxygen
Anaerobe	-	an organism which can live in the absence of free oxygen
Anaerobic	-	pertaining to or in the absence of free oxygen
Anaerobic Digestion	-	the breakdown of organic matter by bacteria in the absence of oxygen
Biochemical Oxygen Demand (BOD_5)	-	a measure of dissolved oxygen consumed in biological processes that degrade organic matter found in water, usually measured after 5 days of incubation at 20°C
Biodegradable	-	containing organic material which may be removed by a biological process
Biogas	-	the gaseous products of anaerobic digestion, consisting primarily of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2)
Biomass	-	the amount of living matter in the form of one or more kinds of organisms which are present in a particular habitat
BVF	-	Bulk volume fermenter
CAPDET	-	computer-aided design package
Chemical Oxygen Demand (COD)	-	an estimate of the organic content of a waste-stream, measuring the organic oxygen equivalent susceptible to permanganate or dichromate oxidation in an acid solution
CRIQ	-	Centre de Recherche Industrielle du Québec
DRECT	-	Demonstration of Resources and Energy Conservation Technology, (Environment Canada)
DSFF	-	a downflow stationary fixed-film reactor
Effluent	-	an outflowing stream
Facultative Anaerobe	-	bacteria which can live or thrive under either aerobic or anaerobic conditions

Hydraulic Retention Time (HRT)	- the average residence time of a volume of wastewater in the reactor, given by: $HRT = \frac{\text{reactor volume}}{\text{influent wastewater flowrate}}$
IAWPRC	- International Association on Water Pollution Control and Research
IGT	- Institute of Gas Technology
Influent	- an inflowing stream
LPG	- liquefied petroleum gas
MEA	- monoethanolamine
Mesophilic	- growing or thriving in a temperature range of 20°C to 35°C
Metabolism	- the process of building up food into living matter and the breakdown of living matter into simpler waste substances, giving off energy
Methanogenic Bacteria	- bacteria responsible for the formation of methane from intermediates in the process of anaerobic digestion
MFR	- methane fermentation residue
NRC	- National Research Council
NSSC	- neutral sulphite semi-chemical
Obligate Anaerobe	- an organism which cannot survive in the presence of oxygen
OMAF	- Ontario Ministry of Agriculture and Food
PAPRICAN	- Pulp and Paper Institute of Canada
PFP	- protein fermentation produced
Psychrophilic	- growing or thriving at a temperature below 20°C
PVC	- polyvinyl chloride
SCP	- single cell protein

Short circuiting	- the rapid passage of wastewater through a treatment vessel such that little or no treatment is achieved
Solids Retention Time (SRT)	- a measure of the average retention time of microorganisms in the reactor, quantified by: $SRT = \frac{\text{volatile suspended solids (VSS) in reactor}}{\text{VSS lost in effluent per day}}$
Substrate	- the food substances used by microorganisms to sustain metabolism
Suspended solids	- those solids which do not settle and do not dissolve in the suspension liquid
Thermophilic	- growing or thriving in a temperature range of 45°C to 60°C
TKN	- total kjeldahl nitrogen
TMP/CTMP	- thermomechanical pulping/chemic-thermomechanical pulping
Total Solids (TS)	- the weight of the solid matter remaining after a sample is dried to constant weight at 103(±1)°C
TSS	- total suspended solids
Void Volume	- the volume of spaces through which the liquid flows in a reactor
Volatile Acids	- low molecular weight acids formed in the first phase of anaerobic treatment
Volatile Solids (VS)	- the difference between the total solids content and the ash remaining after ignition at 550 (±50)°C.
UASB	- an upflow anaerobic sludge bed reactor

GLOSSAIRE DES TERMES ET ABRÉVIATIONS

Acides volatils	-	Acides à faible poids moléculaire formés au cours de la première étape du traitement anaérobie.
Aérobie	-	Qualité d'un organisme qui se développe en présence d'air ou d'oxygène.
AIRPEM	-	Association internationale pour la recherche sur la pollution des eaux et sa maîtrise.
AKT	-	Azote Kjeldahl total.
Anaérobie	-	Qualité d'un organisme qui peut vivre en l'absence d'oxygène libre, ou d'un processus qui utilise ces organismes.
Anaérobie facultatif	-	Microorganisme qui peut vivre ou proliférer dans des conditions aérobies ou anaérobies.
Anaérobie obligatoire	-	Organisme qui ne peut survivre en présence d'oxygène.
Bactéries acétogènes	-	Bactéries responsables de la conversion des composés organiques en acide acétique et en d'autres acides volatils intermédiaires produits au cours du processus de digestion anaérobie.
Bactéries méthanogènes	-	Bactéries responsables de la formation de méthane à partir de composés intermédiaires dans le processus de digestion anaérobie.
Biodégradabilité	-	Caractéristique des matières organiques qui peuvent être détruites par l'action d'organismes vivants.
Biogaz	-	Gaz produit par digestion anaérobie, constitué principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2).
Biomasse	-	Quantité de matière vivante existant dans un écosystème particulier, par unité de volume ou de superficie, et exprimée en unités massiques.
CNRC	-	Conseil national de recherches du Canada.
Court-circuitage	-	Passage trop rapide des eaux usées dans une installation de traitement résultant en un traitement faible ou nul.
CRIQ	-	Centre de recherche industrielle du Québec.

Demande biochimique d'oxygène (DBO_5)	-	Mesure de la pollution de l'eau, définie par la quantité d'oxygène utilisée au cours de l'oxydation biochimique des matières organiques, habituellement après 5 jours d'incubation à 20 °C.
Demande chimique d'oxygène (DCO)	-	Évaluation de la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation des matières oxydables contenues dans un effluent d'eaux usées, en présence de permanganate ou de dichromate de potassium en solution acide.
DFC	-	Digesteur à forte charge.
Digestion anaérobie	-	Dégradation des matières organiques par les bactéries, en l'absence d'oxygène.
Effluent	-	Liquide sortant d'un bassin, d'un réservoir ou d'un émissaire, issu d'une opération de traitement des eaux usées.
GPL	-	Gaz de pétrole liquéfié.
IGT	-	Institute of Gas Technology.
Influent	-	Liquide entrant dans un bassin, un réservoir, etc.
IPPC	-	Institut des Pâtes et Papiers du Canada.
Matières solides en suspension	-	Matières solides qui ne se déposent ni ne se dissolvent dans un fluide.
Matières solides totales (MST)	-	Poids des matières solides après assèchement de l'échantillon jusqu'à poids constant à 103 ($\pm$1) °C).
Matières solides volatiles (MSV)	-	Différence entre la teneur en matières solides et le poids des cendres qui restent après calcination à 550 ($\pm$50) °C.
MCSN	-	Mi-chimique au sulfite neutre.
MEA	-	Monoéthanolamine.
Mésophile	-	Caractéristique d'un organisme croissant ou proliférant dans une plage de températures comprises entre 20 et 35 °C.
Métabolisme	-	Transformations chimiques et biologiques qui se produisent dans les organismes par l'action de certains agents biologiques qui résultent en une croissance, par synthèse, de la matière vivante et une production d'énergie.

MOAA	-	Ministère ontarien de l'Agriculture et de l'Alimentation.
MSS	-	Matières solides en suspension.
PCDTCRE	-	Programme de création et de démonstration de techniques de conservation des ressources et de l'énergie (Environnement Canada).
PFP	-	Produit par fermentation protéinique.
POU	-	Protéines d'organismes unicellulaires.
Psychrophyle	-	Qualité d'un organisme croissant ou proliférant à une température inférieure à 20 °C.
PTM/PTMC	-	Procédé thermomécanique ou thermomécano-chimique de préparation de la pâte à papier.
PCV	-	Poly(chlorure de vinyle).
RALBCA	-	Réacteur anaérobie à lit de boues à courant ascendant.
RLFCD	-	Réacteur à lit (bactérien) fixe à courant descendant.
RFM	-	Résidu de fermentation méthanogène.
Substrat	-	Substances nutritives utilisées par les micro-organismes pour soutenir leur métabolisme.
Temps de rétention des matières solides (TRMS)	-	Durée moyenne de rétention des micro-organismes dans le réacteur, calculée comme suit: $TRSM = \frac{\text{MVS dans le réacteur}}{\text{MVS perdues chaque jour dans l'effluent}}$
Temps de rétention hydraulique (TRH)	-	Temps moyen du séjour des eaux usées dans un réacteur, calculé comme ci-dessous: $TRH = \frac{\text{Volume du réacteur}}{\text{Débit d'eaux usées entrant dans le réacteur}}$
Thermophile	-	Qualité d'un organisme croissant ou proliférant dans une plage de températures de 45 à 60 °C.
Volume vide	-	Volume des espaces à travers lesquels circule un liquide dans un réacteur.

1 INTRODUCTION

The Renewable Resources, Extraction and Processing Division (RREPD), which is part of the Industrial Programs Branch, Environment Canada, is heavily involved in the activities of the agrifood and pulp and paper industries. Within the last ten years, anaerobic treatment of the wastewaters generated by these industries has received increased attention in terms of field research and demonstration. As a result, the RREPD perceived the demand for this compilation of information related to the recent development activity and application of anaerobic technology to industrial wastestreams. To this end, a proposal was submitted and accepted for assistance by the Bioenergy Development Program of Energy Mines and Resources.

The information presented in this review is the result of an extensive literature search in which relevant papers and published reports dating from 1975 to the present were collected. Within this time frame, an intense effort to apply anaerobic technology to industrial wastewaters has been prominent, accompanied by the development of the high rate reactors. These activities in North America,

1 INTRODUCTION

La Division de l'extraction et du traitement des ressources renouvelables (DETRR) de la Direction des programmes industriels d'Environnement Canada, suit de très près les activités de l'industrie agro-alimentaire et de l'industrie des pâtes et papiers. Au cours des dix dernières années, le traitement anaérobie des eaux usées produites par ces industries a suscité un intérêt croissant, si l'on en juge par l'importance de la recherche sur place et des démonstrations dont il a fait l'objet. Le DETRR a conclu qu'une compilation des informations sur les applications et développements récents de la technologie anaérobie relative aux eaux usées industrielles serait utile et la demande d'aide qu'il a présentée à Énergie, Mines et ressources, en vertu du Programme de développement de la bio-énergie a reçu une suite favorable.

Les informations qui suivent proviennent d'une étude exhaustive de la documentation, au cours de laquelle on a recueilli les documents et les rapports pertinents publiés de 1975 à ce jour. Il a été noté qu'au cours de cette période, des efforts notoires ont été déployés pour appliquer les techniques anaérobies aux eaux usées industrielles, en même temps qu'on mettait au point des digesteurs à forte charge. Le présent compte rendu porte sur ces activités en Amérique du

with particular emphasis placed on the Canadian experience, are examined in this review.

This fully referenced review is intended for use by a cross-section of individuals in industry, government, and university communities. It is not a source of design engineering detail or operational data, but is, rather, an observation of the development activity occurring in the field of anaerobic technology. Specific coverage includes:

- an introduction to high-rate reactor configurations;
- identification of waste sources and treatability characteristics;
- description of the process systems employed;
- comments regarding the effectiveness of the technology; and
- discussion of the energy and economic implications.

Nord, en insistant plus particulièrement sur celles qui se sont déroulées au Canada.

Cette étude bien documentée est destinée à l'industrie, au gouvernement et aux universités. Il ne s'agit pas d'une source de données opérationelles ou de précisions techniques conceptuelles, mais plutôt d'une présentation des travaux de développement dans le domaine de la technologie anaérobie. Elle porte, entre autres, sur les domaines suivants:

- configuration de base des modèles de digesteurs à forte charge;
- identification des sources de déchets et caractéristiques de traitabilité;
- description des procédés employés;
- commentaires sur l'efficacité de cette technologie;
- discussion des répercussions énergétiques et économiques.

2 BASIC FUNDAMENTALS OF ANAEROBIC DIGESTION

2.1 Historical Synopsis

Anaerobic digestion is the breakdown of organic matter by bacteria in the absence of oxygen. This process, which produces methane gas, occurs naturally in streams and ponds and has been recognized since the 17th century as a means of producing combustible gas from the decomposition of organic material. The scientific study of anaerobics was not intensified in North America until World War I, however, when the demand for solvents stimulated the large-scale development of fermentation. Subsequently, the application of anaerobic technology was primarily associated with the treatment of primary and secondary sewage sludges. However, in the early 1970's, North American interest in other industrial applications of anaerobic technology began to rise, and continues to escalate today.

Compared to other developing and industrialized countries, the economic and environmental incentives encouraging the development of anaerobic treatment had not been as strong in North America until the early 1970's. North America has been slower to adopt large-scale anaerobic technology because of abundant

2 PRINCIPES DE BASE DE LA DIGESTION ANAÉROBIE

2.1 Historique

La digestion anaérobie est la dégradation des matières organiques par des bactéries en l'absence d'oxygène. Ce processus, qui génère du méthane, est observable dans la nature, dans les cours d'eau et les étangs, et dès le 17^{e} siècle, on s'est rendu compte qu'il était possible d'obtenir du gaz combustible à partir de la décomposition des matières organiques. En Amérique du Nord, l'étude scientifique du processus anaérobie n'a pris de l'ampleur qu'à partir de la Première guerre mondiale, lorsqu'une forte demande de solvants a stimulé le développement à grande échelle de la fermentation. Par la suite, cette technologie a été appliquée principalement au traitement des boues résiduaires primaires et secondaires. Toutefois, au début des années 1970, l'intérêt des Nord-américains pour les autres applications industrielles de la technologie anaérobie a pris de l'ampleur et continue à croître actuellement.

Ce n'est qu'au début des années 1970 que les incitatifs économiques et environnementaux favorisant le développement des traitements anaérobies ont pris de l'importance en Amérique du Nord, soit beaucoup plus tard que dans d'autres pays en voie de développement ou industrialisés. L'Amérique du Nord a mis plus de temps à adopter les technologies anaérobies à grande échelle parce qu'elle possède

domestic energy resources. In developing countries, where the availability of fuels is scarce and/or expensive, low technology digesters are used to produce methane gas for home heating and cooking. In India, more than one million family digesters existed in 1985, while more than seven million digesters were in use in the rural areas of China[1]. These small-scale digesters have been considered in the literature[2,3]. Nyns et al. reported on 550 biogas digesters that were existing in 1983 in the European community and Switzerland[4]. An extensive bibliography has been provided by Van Brakel concerning various digester types used in European experience before 1970[5]. The development and advancement of anaerobic technology has been reviewed by specialists for many countries, including: China[6,7], Japan[8], Latin America[9,10], South America[11], the Philippines[12] and Peru[13]. Several digester designs now being developed in North America have shown previous operating success in other countries.

2.2 Process Analysis

A wide variety of anaerobic treatment processes have evolved to meet the demands of industrial application, accompanied by an increased understanding of anaerobic process

des ressources énergétiques abondantes. Dans les pays en voie de développement, où les combustibles sont rares ou coûteux, des digesteurs rudimentaires fournissent le méthane nécessaire pour le chauffage et la cuisson domestiques. En Inde, on comptait plus d'un million de foyers équipés de digesteurs en 1985, et plus de sept millions de digesteurs étaient utilisés dans les régions rurales de la Chine[1]. Ces petits digesteurs ont fait l'objet de publications scientifiques[2, 3]. Nyns et al. donnent des précisions sur les 550 digesteurs producteurs de biogaz qu'on a dénombrés en 1983 dans la Communauté économique européenne et en Suisse[4]. Van Brakel a compilé une bibliographie exhaustive des divers types de digesteurs utilisés en Europe avant 1970[5]. Le développement et le perfectionnement de la technologie anaérobie ont été étudiés par des spécialistes dans plusieurs pays, en particulier la Chine[6, 7], le Japon[8], l'Amérique latine[9, 10], l'Amérique du Sud[11], les Philippines[12] et le Pérou[13]. Plusieurs modèles de digesteurs actuellement à l'étude en Amérique du Nord ont donné des résultats satisfaisants dans d'autres pays.

2.2 Analyse du processus

Nombre de méthodes diverses de traitement anaérobie ont été perfectionnées pour faire face à la demande créée par les applications industrielles, et cela a permis de mieux comprendre les principes du processus

fundamentals. The developments in processing parameters are introduced in this section, and the new high rate reactor designs are described in brief.

From research, the knowledge of microbiology and biochemistry involved in the anaerobic conversion process is improving. It is now widely recognized that there are three basic phases involved in the anaerobic degradation of an organic material and a particular group of bacteria is associated with each phase. The first group of bacteria is responsible for the breakdown of organic compounds to individual monomers. These monomers are, in turn, fermented to various intermediates including propionic, butyric and acetic acids. Second stage acetogenic bacteria then metabolize these intermediates to hydrogen, carbon dioxide and acetic acid. In the third stage, methanogenic bacteria convert acetic acid and carbon dioxide to methane. The major precursor of methane is acetic acid[14,15]; however, no methane-forming species has been found which is capable of single step conversion of a complex substrate to methane[16]. A list of organic compounds degradable by anaerobic bacteria is presented by Speece[17]. A treatability study performed at a U.S. laboratory suggests that, in general, any organic

anaérobie. Le présent chapitre porte sur les procédés de traitement les plus récents ainsi que sur les nouveaux modèles de digesteurs à forte charge.

La recherche permet d'approfondir les connaissances sur la microbiologie et la biochimie des processus de conversion en milieu anaérobie. Il est à présent bien connu que la dégradation anaérobie d'un produit organique passe par trois phases fondamentales, et qu'un groupe particulier de bactéries est associé à chacune d'elles. Le premier groupe de bactéries entraîne la dégradation des matières organiques en monomères. Ces monomères sont eux-mêmes convertis par fermentation en divers composés intermédiaires, dont l'acide propionique, l'acide butyrique et l'acide acétique. Les bactéries acétogènes de la deuxième étape métabolisent ensuite les composés intermédiaires en hydrogène, en dioxyde de carbone et en acide acétique. Au cours de la troisième étape, les bactéries méthanogènes convertissent l'acide acétique et le dioxyde de carbone en méthane. Le principal précurseur du méthane est l'acide acétique[14, 15]; toutefois, on n'a pas réussi à déceler l'existence d'une espèce méthanogène capable de convertir en une seule étape un substrat complexe en méthane[16]. Speece[17] présente une liste des composés organiques dégradables par les bactéries anaérobies. Une étude de traitabilité effectuée dans un laboratoire des États-Unis permet de penser que, en général, toute substance organique pouvant être traitée par voie aérobie peut également

substance that can be treated aerobically is also degradable by anaerobic bacteria[18]. The classification and characterization of anaerobes, and the kinetics of acetic acid conversion have been extensively reviewed[19-21] and updated[22]. As a result, accurate predictions of the steady-state acetate concentration in anaerobic reactors can be made.

The anaerobic conversion process depends on several parameters including: the pH/alkalinity, nutrient requirements, temperature, retention time, and loading rate.

The optimal pH in an anaerobic system ranges from 6.6 to 7.6. If the methanogenic bacteria are not able to convert the volatile acids as rapidly as they are produced by the acetogenic bacteria, the volatile acids will accumulate and cause a depression in the digester pH. If this is allowed to continue, the pH will be depressed outside the optimum range and poor performance of the digester will result. The ability to increase the alkalinity and control the pH for many wastewaters that are low in alkalinity is essential to maintain optimum digester pH and performance. While alkalinity requirements vary with the waste, system operation, and the type of process, models and charts to cal-

être dégradée par des bactéries anaérobies[18]. La classification et la caractérisation des organismes anaérobies, ainsi que la cinétique de la conversion de l'acide acétique, ont été étudiées de façon extensive[19 à 21] et mises à jour[22]. Par conséquent, il est possible de prévoir avec précision quelles seront les teneurs en acétates à l'équilibre dans les digesteurs anaérobies.

Le processus du traitement anaérobie dépend de plusieurs paramètres. Parmi eux, mentionnons le pH/alcalinité, la demande en substances nutritives, la température, le temps de rétention et la charge.

Le pH optimal des systèmes anaérobies se situe entre 6,6 et 7,6. Si le rythme de conversion des acides volatils par les bactéries méthanogènes n'est pas aussi rapide que leur rythme de production par les bactéries acétogènes, ces acides s'accumulent et entraînent une forte baisse du pH dans le digesteur. Si le pH n'est pas corrigé, il débordera de la plage optimale, et il en résultera un mauvais rendement du digesteur. Pour un grand nombre d'eaux usées à faible alcalinité, il faut pouvoir augmenter l'alcalinité et régler le pH si l'on veut maintenir un pH optimal et obtenir d'un digesteur le meilleur rendement possible. Étant donné que les exigences d'alcalinité varient selon les eaux usées, le mode d'exploitation du système et le type de procédé, on a élaboré des modèles et des graphiques permettant de les calculer[23 à 25].

culate alkalinity requirements have been developed (23-25).

The major nutrients required to sustain anaerobes are nitrogen (N) and phosphorus (P). Other growth factors have complex effects[26, 27], but their significance is not normally as great as the nitrogen and phosphorus content.

Another important environmental condition which influences the rate of anaerobic metabolism is temperature. Although earlier literature identifies an optimum of 30 to 37°C, digesters studied within the mesophilic (20 to 45°C) and thermophilic (above 45°C) temperature ranges have achieved satisfactory anaerobic conversion[27-29]. Dague [30] notes that temperature variation, rather than the actual temperature is more relevant to process stability.

The biological solids retention time (SRT), generally expressed in days, represents the average retention time of microorganisms in the digester. The SRT is usually determined by dividing the mass sum of the volatile solids (representing biological solids) in the digestion system by the mass sum of the volatile solids leaving the system (usually by the effluent and/or controlled wasting) each day. The hydraulic retention time (HRT) is the

Les principaux éléments nutritifs requis pour la survie des populations de bactéries anaérobies sont l'azote (N) et le phosphore (P). D'autres facteurs de croissance ont des effets complexes[26, 27], mais normalement, leur importance n'est pas aussi grande que celle de la teneur en azote et en phosphore.

La température est, elle aussi, un élément important, à cause de ses répercussions sur la vitesse de métabolisme anaérobie. Bien que la documentation plus ancienne mentionne comme valeur optimale une plage de 30 à 37 °C, l'étude du rendement des digesteurs dans des plages de températures mésophiles (20 à 35 °C) et thermophiles (plus de 45 °C) a révélé qu'on pouvait obtenir des taux satisfaisants de conversion anaérobie[27 à 29]. Dague[30] signale que les variations de température ont une plus grande influence sur la stabilité du procédé que le degré de température lui-même.

Le temps de rétention des matières solides biologiques (TRMS), généralement exprimé en jours, représente le temps moyen de rétention des micro-organismes dans le digesteur. Le TRMS est habituellement calculé en divisant la masse des matières solides volatiles (représentant les matières biologiques solides) dans le système de digestion par la masse des matières solides volatiles sortant chaque jour du système (habituellement par rejet dans l'effluent et/ou par perte contrôlée). Le temps de rétention hydraulique

ratio of the reactor volume divided by the average daily influent flow and is usually expressed in days. These parameters are especially relevant to the advanced high-rate reactors, which have achieved independent control of the SRT and HRT through the retention of biomass.

2.2.1 Reactor Types. Conventional reactor designs, such as the plug flow, complete-mix digesters, and anaerobic lagoons are characterized by a long HRT (10 to 30 days). The plug-flow digester and anaerobic lagoon is a tunnel-type reactor in which the influent theoretically moves as a plug. The complete mix digester is commonly a circular silo configuration, in which mixing is accomplished by mechanical mixing devices, or liquid or biogas recirculation incorporated into the digester design. Most anaerobic lagoons are excavated to a depth of 3 to 6 metres to maintain anaerobic conditions and conserve heat. The lagoon contents are usually not heated and provisions must be made for extra storage space during the winter months in cold climates, when bacterial activity is at a minimum. In some cases the lagoon is covered, which makes it possible to recover the biogas produced. Covering the lagoon also reduces odours and heat loss.

(TRH) s'obtient en divisant le volume du réacteur par le débit quotidien moyen de l'influent, et il est habituellement exprimé en jours. Ces paramètres sont particulièrement importants pour les digesteurs perfectionnés et à forte charge où l'on pratique un contrôle indépendant du TRMS et du TRH par rétention de la biomasse.

2.2.1 Types de digesteurs. - Les modèles classiques de digesteurs, comme les digesteurs à flux piston (alimentation en bloc), les digesteurs à mélange intégral et les étangs anaérobies sont caractérisés par un long TRH (10 à 30 jours). Le digesteur à flux piston et l'étang anaérobie consistent en bassins de forme allongée dans lesquels la masse polluante à traiter est introduite de façon ponctuelle. Le digesteur à mélange intégral a habituellement une configuration de type silo; dans celui-ci le mélange est effectué par des dispositifs de brassage, ou encore par des dispositifs de recirculation du liquide ou du biogaz qui font partie intégrante du digesteur. La plupart des étangs anaérobies ont une profondeur de 3 à 6 mètres pour maintenir les conditions voulues et conserver la chaleur. Habituellement, le contenu de l'étang n'est pas chauffé dans les régions froides et il faut prévoir un espace supplémentaire de stockage au cours des mois d'hiver, lorsque l'activité bactérienne est à son niveau minimal. Dans certains cas, l'étang est couvert, ce qui permet de récupérer le biogaz produit. La couverture de l'étang réduit également les odeurs et la perte de chaleur.

Interest in advanced high-rate reactors has been rapidly increasing. These reactors differ from the conventional standard rate designs in that various methods are used to retain biomass. The slow growth of methanogenic bacteria, with a mass doubling time of over 80 days[31], is why biomass retention is important to the performance of the high rate reactors[32]. Compared to the conventional reactors in which the SRT and HRT are equal, the retention of biomass permits a substantial reduction of the HRT while maintaining a longer SRT.

High rate reactors differ from one another in the method of biomass retention. A comprehensive introduction to the high rate reactors is provided by Van den Berg and Kennedy[32], who discuss the state of development and the treatment characteristics of each reactor. Other comparative studies of the high rate reactors are also available[33-38]. For readers unfamiliar with the advances in anaerobic treatment, a brief introduction to the high-rate reactors is provided here for reference purposes.

In the early 1950's, the contact process became the first high-rate reactor to be systematically studied and developed[39]. The contact process utilizes the conventional com-

On s'intéresse de plus en plus aux digesteurs perfectionnés à forte charge. Ces digesteurs diffèrent des modèles à moyenne charge du fait que la biomasse est maintenue par diverses méthodes. Les bactéries méthanogènes croissent lentement (leur masse double en plus de 80 jours[31]), ce qui explique pourquoi la rétention de la biomasse a une répercussion importante sur la performance des digesteurs à forte charge[32]. Comparativement aux digesteurs classiques dans lesquels le TRMS et le TRH sont égaux, la rétention de la biomasse permet un abaissement important du TRH tout en permettant de conserver un TRMS plus long.

Les types de digesteurs à forte charge diffèrent selon la méthode de rétention de la biomasse. Van den Berg et Kennedy[32] ont rédigé une introduction très complète aux digesteurs à forte charge, dans laquelle ils ont examiné le stade de développement et les caractéristiques de traitement de chaque type de digesteur. D'autres études comparatives des digesteurs à forte charge sont également disponibles[33 à 38]. Pour les lecteurs qui ne seraient pas familiers avec les progrès du traitement anaérobie, voici une brève introduction aux digesteurs à forte charge, avec les références pertinentes.

Au début des années 1950, le processus par contact dans un digesteur à forte charge a été le premier à faire l'objet d'une étude systématique et d'une mise au point[39]. Le processus par contact est basé sur l'utilisation

plete-mix reactor, but incorporates a solids recycle from a solids settlement tank allowing the HRT to decrease while maintaining the SRT.

The fixed-film reactors, such as the anaerobic filter and the downflow stationary fixed-film (DSFF) reactor, employ a fixed medium on which bacteria grow. The "1st International Conference on Fixed-film Biological Processes" was held in 1982, at which several North American papers pertaining to fixed-film anaerobic reactors were presented, including a comprehensive literature review paper[40].

In the anaerobic filter, which was first described by Young and McCarty in 1967[41], the feed stream is passed upward through the filter medium. The biological solids produced become attached to surfaces or trapped within interstices of the support medium. Treatment of wastewater derives from both suspended and biofilm growth. Since suspended growth tends to collect in the bottom of the reactor, a liquid distribution system is necessary. The state-of-the-art on the anaerobic filter has

d'un digesteur à mélange intégral classique, avec intégration du recyclage des matières solides provenant d'un décanteur, ce qui permet une diminution du TRH tout en conservant le TRMS.

Les réacteurs à lits bactériens, par exemple le réacteur à lit bactérien fixe à courant descendant (RLFCD) et le réacteur à filtre biologique anaérobie, utilisent un milieu fixe sur lequel croissent les bactéries. La Première conférence internationale sur les processus biologiques à lits bactériens (1st International Conference on Fixed-film Biological Processes) a eu lieu en 1982 et au cours de celle-ci, plusieurs ouvrages nord-américains portant sur les réacteurs anaérobies à lits bactériens ont été présentés, y compris une étude exhaustive de la documentation[40].

Dans le cas de la filtration biologique que Young et McCarty ont été les premiers à décrire, en 1967[41], le courant d'alimentation est dirigé vers le haut à travers le milieu filtrant. Les matières biologiques solides produites sont retenues sur les surfaces ou piégées dans les interstices du matériau de support. Le traitement des eaux usées résulte de la prolifération bactérienne à la fois dans la suspension et sur la biopellicule. Étant donné que la prolifération bactérienne dans la suspension tend à se déposer au fond du réacteur, un système de brassage du liquide est nécessaire. Une étude de Young[42] fait le

been updated in a review by Young[42].

The downflow fixed-film reactor was developed at Canada's National Research Council (NRC) by Van den Berg and co-workers[43]. Effluent is removed from the bottom of the reactor so that very little suspended growth occurs or is retained. The media are vertically aligned to afford a straight-through liquid run from the top to the bottom of the reactor. Gas production from the biological film provides a degree of mixing so that the need for an elaborate distribution system is eliminated.

The upflow anaerobic sludge bed (UASB) was first developed in the Netherlands and is widely used there[44-46]. This reactor operates entirely as a suspended growth system, and consequently, does not contain a packing material. It contains a gas/liquid/solid separation device to separate the gas, digester effluent and suspended solids at the surface of the reactor. In the UASB reactor biomass is retained as a blanket which is kept in suspension by controlling the upward flow velocity of the feedstream. A very concentrated sludge bed, characterized by a dense granular sludge, develops at the bottom of the reactor. Above the bed, a blanket

point sur l'état actuel des connaissances en matière de filtration dans des conditions anaérobies.

Le réacteur à lit bactérien fixe à courant descendant (RLFCD) a été mis au point au Centre national de recherches du Canada (CNRC) par Van den Berg et al.[43]. L'effluent est soutiré du fond du réacteur de façon à ce que très peu de matières de croissance en suspension soient formées ou retenues. Le milieu filtrant est en position verticale pour assurer un écoulement direct du liquide de surface jusqu'au fond du réacteur. La production de gaz par le film biologique assure un certain mélange, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de prévoir un système complexe de brassage du liquide.

Le réacteur anaérobie à lit de boues à courant ascendant (RALBCA) a d'abord été mis au point aux Pays-Bas, où il est très répandu[44 à 46]. Cet appareil fonctionne entièrement comme un système traditionnel de croissance en suspension et, par conséquent, il ne contient pas de matériau de remplissage. Il comporte un dispositif de séparation gaz/liquide/solide destiné à séparer le gaz, l'effluent du digesteur et les matières en suspension à la surface du réacteur. Dans le réacteur RALBCA, la biomasse est retenue sous forme d'une couche qui est gardée en suspension par le contrôle de la vitesse d'écoulement vers le haut du courant d'alimentation. Un lit de boues très concentrées, denses et granulaires, se forme au fond du réacteur. Au-dessus du lit, il se

zone of more diffuse growth with lower particle settling velocities develops. Solid/liquid/gas separation occurs in a quiescent settling zone below the gas collector.

In the fluidized/expanded bed reactors, bacteria are grown on particles of a medium such as sand. A rapid, even flow of liquid is pumped upwards to keep the particles in suspension[47, 48]. The rate of liquid flow, and the resulting degree of expansion of the bed, ranging from 5 to 25% of the settled bed volume, distinguish the reactor designation as either a fluidized or expanded bed reactor. The expansion of the media increases the surface area available for bacterial growth.

Modifications of these reactor types have given rise to other anaerobic reactor configurations. One such lab-scale investigation is the baffled sludge blanket introduced by Bachmann et al.[49], with subsequent performance evaluations[50, 51]. The baffled sludge blanket combines the principles of biological solids attachment on a filter media with the upflow sludge bed process. Another modified design is the anaerobic rotating biological contactor[52, 53], which couples the fixed-film growth of anaerobes with the rotating biological contactor

forme une couche de croissance plus diffuse caractérisée par de plus faibles vitesses de dépôt des particules formées. La séparation solide/liquide/gaz se fait dans une zone de décantation relativement calme sous le collecteur à gaz.

Dans les réacteurs à lit fluidisé en expansion, des bactéries croissent sur des particules servant de milieu, par exemple du sable. Le liquide est pompé rapidement et à un débit uniforme vers le haut pour garder les particules en suspension[47, 48]. Le débit du liquide et le degré d'expansion du lit qui en résulte, compris entre 5 et 25 p. 100 du volume du lit décanté, permet de distinguer le type de réacteur, qui est appelé réacteur à lit fluidisé ou à lit en expansion. L'expansion du milieu augmente la surface disponible pour la croissance bactérienne.

Des modifications de ces types d'appareils sont à l'origine d'autres configurations de réacteurs anaérobies. Bachmann et al.[49] ont mis au point un modèle de laboratoire de réacteurs à couches de boues cloisonnées, dont les performances ont été évaluées par la suite[50, 51]. Ce type de réacteur combine les principes de la fixation des solides biologiques sur un milieu filtrant avec le processus du lit de boues maintenu par un courant ascendant. Un autre modèle modifié du contacteur biologique rotatif anaérobie[52, 53], consiste à combiner la technique de croissance sur support fixe des organismes anaérobies à celle du contacteur biologique

previously used for aerobic waste treatment. Other methods of cell retention are being actively researched(54-57).

The two-stage digestion process(58-67), which uses two reactors to separate and optimize the environments of the acetogenic and methanogenic bacteria has been well documented. In the two-stage process, the rapid growth rate of the acetogenic bacteria and their ability to recover from environmental imbalances encourages an improvement in process control over the single-stage systems.

This discussion has provided an introduction to the variety of both conventional and high-rate anaerobic processes. However, from a practical viewpoint, interest should be focussed on the applicability of these systems in the treatment of specific wastes. The experiences and degree of success achieved in applying anaerobic technology, therefore, is documented by industrial sector (agriculture, food processing, and pulp and paper) in the following sections.

rotatif déjà utilisé pour le traitement aérobie. D'autres méthodes de rétention cellulaire font l'objet de recherches très actives(54 à 57).

Le processus de digestion à deux étapes(58 à 67), basé sur l'utilisation de deux réacteurs pour séparer et optimiser les milieux de développement des bactéries acétogènes et méthanogènes, a fait l'objet d'études approfondies. Au cours du processus à deux étapes, la vitesse de croissance rapide des bactéries acétogènes et leur aptitude à ramener à l'équilibre le système après des perturbations du milieu sont des signes encourageants qui montrent qu'il est possible d'améliorer le contrôle du processus.

La présente discussion constitue une introduction à une grande variété de processus anaérobies classiques et à forte charge. Toutefois, d'un point de vue pratique, on étudiera principalement les possibilités d'application de ces systèmes au traitement de certaines eaux usées. L'expérience et le succès obtenus lors de l'application de technologies anaérobies seront donc décrits par secteur industriel (agriculture, industrie alimentaire, industrie des pâtes et papiers) dans les sections qui suivent.

References

1. National Academy of Sciences, Methane Generation from Human, Animal and Agricultural Wastes, Washington D.C. (1977).

2. Simpson, M.H., and E.C. Morales, "Demonstration of Anaerobic Biogas Digesters in Developing Countries", Journal of Environmental Science, 23, No. 2, p. 20-24 (March, 1980).

3. Freeman, C. and L. Pyle, Methane Generation by Anaerobic Fermentation: An Annotated Bibliography. A Critical Review of the Literature with Particular Reference to Small-scale and Rural Applications, London Intermediate Technology Publications (1977).

4. Nyns, E.J., H.P. Naveau, and M. Demuynck, "Biogas Plants in the European Community and Switzerland: Status, Bottlenecks, Future Prospects", Third Int. Symp. Anaerobic Digestion, Boston (1983).

5. Van Brakel, J., "Biogas Before 1970: A Review", Trop. Sci., 22, 105 (1980).

6. Cui Xuan, and Xie Zhiheng, "An Outline on the Biogas Development in China", 4th Int. Symp. Anaerobic Digestion (Nov., 1985).

7. Chen, R.C., "Up-to-Date Status of Anaerobic Digestion Technology in China", 4th Int. Symp. Anaerobic Digestion (Nov., 1985).

8. T. Yamamoto and S. Oi, "On the Anaerobic Digestion Research and Development in Japan", 3rd. Int. Symp. Anaerobic Digestion (1983).

9. Caceres, R. and B. Chiliquinga, "Experiences with Rural Biodigesters in Latin America", 4th Int. Symp. Anaerobic Digestion (Nov., 1985).

10. Martinez A.M. and P. Mulas, "Status of Anaerobic Digestion Development in Latin America", 3rd. Int. Symp. Anaerobic Digestion (1983).

11. Silva, Normando A., "Biogas in South America", 4th Int. Symp. Anaerobic Digestion (Nov., 1985).

12. Maramka, F.D. Sr., A. Judon, Jr., and E. Obias, "Fuel, Feed and Fertilizer from Farm Wastes", 3rd. Int. Symp. Anaerobic Digestion (1983).

13. Mateo, M., J. Verastegui, J. Ascue, and M. del Pilar Castillo, "Experiences in the Application of Biogas Technology in Peru: Political, Socio-Economical and Environmental Considerations", 3rd. Int. Symp. Anaerobic Digestion (1983).

14. Smith, P.H. and R.A. Mah, "Kinetics of Acetate Metabolism during Sludge Digestion", Applied Microbiology, 14, 368-371 (1966).

15. McCarty, P.L., "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals", Parts 1, 2, 3, Public Works (Sept., Oct., Nov., 1964).

16. Zehnder, A.J.B., "Ecology of Methane Formation", Water Pollution Microbiology, Vol. 2, R. Mitchell (ed.), J. Wiley and Sons, Toronto, p. 349 (1978).

17. Speece, R.E., "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment", Environ Sci. Technol. 17, No. 9 (1983).

18. Olthof, M., W.R. Kelly, G. Wagner, and J. Oleskiewicz, "Anaerobic Treatment of a Variety of Industrial Waste Streams", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

19. Fannin, K. F., "Anaerobic Processes", Journal WPCF, 54, No. 6 (1982).

20. Mosey, F.E., "Anaerobic Biological Treatment of Food Industry Waste Waters", Wat. Poll. Cont., 80, (2), p. 273 (1981).

21. Mosey F.E., "Methane Fermentation of Organic Wastes", Tribune Cebedeau, 34, (453-454) Liege, Belgium (1981).

22. Mosey, F.E., "New Developments in the Anaerobic Treatment of Industrial Wastes", Effluent and Water Treatment Journal (March, 1983).

23. Pohland, F.G. and M.T. Suidon, "Prediction of pH Stability in Biological Treatment Systems", in: Chemistry of Wastewater Technology, A.J. Rubin (ed.), Ann Arbor Science Ltd., p. 441 (1978).

24. Li, A. and P.M. Sutton, "Determination of Alkalinity Requirements for the Anaerobic Treatment Process, "Proc. of the 38th Ind. Waste Conf. (1984).

25. Mueller, J.A., J. Famularo, and T.J. Mulligan, "Application of Carbonate Equilibria to High Purity Oxygen and Anaerobic Filter Systems", in: Chemistry of Wastewater Technology, A.J. Rubin (ed.), Ann Arbor Science Ltd. (1978).

26. Speece, R.E., "Fundamentals of the Anaerobic Digestion of Municipal Sludges and Industrial Wastes", Seminar on Anaerobic Wastewater Treatment and Energy Recovery, Pittsburgh (Nov., 1981).

27. McKinney, R.E., "Anaerobic Treatment Concepts", TAPPI Environmental Conference (1984).

28. Duff, S.J.B. and K.J. Kennedy, "Thermophilic and Mesophilic Operation of Downflow Anaerobic Fixed Film (DAFF) Reactors", 5th Canadian Bioenergy R&D Seminar (1984).

29. Buhr, H.O. and J.F. Andrews, "The Thermophilic Anaerobic Digestion Process", Water Research, 11 (1977).

30. Dague, R.R., "Application of Digestor Theory to Digester Control", J. Water Pollution Control Federation, 40, p. 2021 (1968).

31. Van den Berg, L., "Effect of Temperature on Growth and Activity of a Methanogenic Culture Utilizing Acetate", Can. J. Microbiol., 23, 898-902 (1977).

32. Van den Berg, L. and Kennedy, K.J., "Comparison of Advanced Anaerobic Reactor", Proc. of 3rd Int. Symposium on Anaerobic Digestion, Boston, MA (Aug., 1983).

33. Van den Berg, L., C.P. Lentz, and D.W. Armstrong, "Anaerobic Waste Treatment Efficiency Comparisons Between Fixed Film Reactors, Contact Digesters and Fully Mixed, Continuously Fed Digesters", Proc. of the 35th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. (1981).

34. Hall, E. R. and H. Melcer, "Energy Recovery from Wastewater by High Rate Anaerobic Treatment", Water and Pollution Control (March/April, 1984).

35. Oleszkiewicz, J.A., "Suspended Versus Attached Growth Systems - Process Comparison", Seminar on Anaerobic Wastewater Treatment and Energy Recovery (1981).

36. Hall, E.R., "Biomass Retention and Mixing Characteristics in Fixed Film and Suspended Growth Anaerobic Reactors", presented at Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors, IAWPR, Copenhagen (1982).

37. Anderson, G.K. and C.B. Saw, "State of the Art of Anaerobic Digestion for Industrial Applications in the United Kingdom", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. (1985).

38. Frostell, B., "Anaerobic Treatment in a Sludge Bed System Compared with a Filter System", Journal WPCF, 53, No. 2 (1981).

39. Schroepfer, G.J., W.J. Fuller, A.S. Johnson, N.R. Ziemke, and J.J. Anderson, "The Anaerobic Contact Process as Applied to Packinghouse Wastes", Sewage Ind. Wastes, 27, 460-486 (1955).

40. Henze M. (ed.), Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors, Water Science and Tech., 15, No. 8/9 (1983).

41. Young, J.C. and P.L. McCarty, "The Anaerobic Filter for Waste Treatment", Proc. of the 22nd Ind. Waste Conf., Purdue Univ. (1967).

42. Young, J.C., "The Anaerobic Filter - Past, Present and Future", Proc. of 3rd Int. Symp. Anaerobic Digestion (1983).

43. Van den Berg, L. and C.P. Lentz, "Comparison Between Up and Downflow Anaerobic Fixed Film Reactors of Varying Surface to Volume Ratios for the Treatment of Bean Blanching Waste", Proc. of the 34th Ind. Waste Conf. (1980).

44. Pette, K.C. et al., "Full Scale Anaerobic Treatment of Beet-sugar Wastewater", Proc. 35th Ind. Waste Conf., Purdue University, 635 (1981).

45. Lettinga, G. and J.N. Vinken, "Feasibility of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Process for the Treatment of Low-strength Wastes", Proc. 35th Ind. Waste Conf., Purdue University, (1981).

46. Lettinga, G., A.F.M. Van Velsen, S.W. Hobma, W. de Zeeuw, and A. Klapwijk, Biotechnol. Bioeng., 22, 649-734 (1980).

47. Chen, J., C.T. Li, and W.K. Shieh, "Performance Evaluation of the Anaerobic Fluidized Bed Biofilm Reactor: Methane Production from Glucose", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf., (1985).

48. Mueller, J.A., K. Subburamu, and E.J. Donovan, Jr., "Simplified Kinetic Analysis of the Anaerobic Fluidized Bed Reactor", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

49. Bachmann, A., V. L. Beard, and P. McCarty, "Comparison of Fixed Film Reactors with a Modified Sludge Blanket Reactor", presented at 1st Int. Conf. on Fixed-film Biological Processes, Ohio (April, 1982).

50. Guiot, S.R. and L. Van den Berg, "Performance of an Upflow Anaerobic Reactor Combining a Sludge Blanket and a Filter Treating Sugar Waste", Biotech, and Bioeng., 27 (1985).

51. Gorur, S.S., S.R. Guiot, and K.J. Kennedy, "Anaerobic Upflow Sludge Bed Filter Reactor Treating Dilute Carbohydrate Wastewaters", Toxic and Hazardous Wastes: Proc. 18th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf. (1986).

52. Tait, S.J. and A.A. Friedman, "Anaerobic Rotating Biological Contactor for Carbonaceous Wastewater", Journal WPCF, 52, p. 2257 (August, 1980).

53. Laquidara, M.J., F.C. Blanc, and J. O'Shaughnessy, "Development of Biofilm in the Anaerobic Rotating Biological Contactor Process", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

54. Binot, R.A., T. Bol, H.T. Naveau, and E.J. Nyns, "Biomethanation by Immobilized Fluidized Cells", Proc. IAWPR Seminar Anaerobic Treatment of Waste Water in Fixed Film Reactors, Copenhagen (1982).

55. Martensson, L. and B. Frostell, "Anaerobic Wastewater Treatment in a Carrier Assisted Sludge Bed Reactor", Proc. IAWPR Seminar Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors, Copenhagen (1982).

56. Oleszkiewicz, J.A. and M. Olthoff, "Anaerobic Biofiltration-process Modification and System Design", Proc. 1st Int. Conf. Fixed Film Biol. Process, 1644-1666 (1982).

57. Saw, C.B., G.K. Anderson, G.K., A. James, and M.S. Le, "A Membrane Technique for Biomass Retention in Anaerobic Waste Treatment Processes", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

58. Persson, S.P.E., et al., "Agricultural Anaerobic Digesters - Design and Operation". Bulletin 827, Penn. State Univ., Univ. Park, PA (1979).

59. Mossey, M.L. and F.G. Pohland, "Phase Separation of Anaerobic Stabilization by Kinetic Control", Journal of Water Poll. Cont. Fed., 50, 9, p. 2204 (1978).

60. Cohen, A., R.J. Zoetemeyer, A. Van Dearsen, and J.G. Van Andel, "Anaerobic Digestion of Glucose with Separated Acid Production and Methane Formation", Water Research, 13, p. 571 (1979).

61. Jeffries, T.W., R.R. Onstead, R.R. Cardenos, and H.P. Gregor, Biotechnology and Bioengineering, Symposium No. 8, 31-49 (1978).

62. Ghosh, S., J.P. Ombregt, V.H. DeProost, and P. Pipyn, "Methane Production from Industrial Wastes by Two-Phase Anaerobic Digestion", Energy from Biomass and Wastes VI (Jan., 1982).

63. Ghosh, S. and Klass, D.L., "Two Phase Anaerobic Digestion", Process Biochem., 13 (4), 15 (1978).

64. Hausler, J., "The Succession of Microbial Process in the Anaerobic Decomposition of Organic Compounds", Advances in Water Poll. Research, p. 407 (1969).

65. Khan, A.W., S. Shea Miller, and W.D. Murray, "Development of a Two-Phase Combination Fermenter for the Conversion of Cellulose to Methane", Biotechnol. Bioeng., 25 (6), 1571-1579 (1983).

66. Kennedy, K.J. and Van den Berg, L., Biotechnol. Letts., 4 (2), 137 (1982).

67. Cohen, A., A.M. Breure, J.G. Van Andel, and A. Van Deursen, "Influence of Phase Separation on the Anaerobic Digestion of Glucose - Maximum COD - Turnover Rate During Continuous Operation", Water Research, 14, 1439-1448 (1980).

3 AGRICULTURAL APPLICATION OF ANAEROBIC DIGESTION

3.1 Incentives for Development

During the past thirty years, the size and intensity of farming operations have increased. As a result, the livestock industry has become highly energy dependent through the use of mechanized equipment which operates on fossil fuels and electricity. While no shortage of energy is immediately anticipated in North America, the potential energy available through the anaerobic digestion of livestock wastes has attracted the attention of farm operators. This energy source is associated with the methane component of biogas, the gaseous products of an anaerobic process.

Lapp et al. (1) first promoted on-farm anaerobic digestion as a method of energy self-sufficiency following the rise in energy costs associated with the 1973 oil embargo. While it has been stated that on-farm energy recovery from anaerobic systems will not greatly affect the overall national energy balance[2], it can be of economic significance for specific farm operations[3,4]. In Canada, the federal Department of Agriculture provides financial assistance for the development of energy efficient tech-

3 APPLICATIONS AGRICOLES DE LA DIGESTION ANAÉROBIE

3.1 Incitatifs au développement

Au cours des trente dernières années, les opérations agricoles ont cru en ampleur et en intensité et il en est résulté une forte demande énergétique de l'industrie de l'élevage, qui utilise de l'équipement mécanisé consommant des combustibles fossiles et de l'électricité. Bien qu'on ne prévoie aucune pénurie imminente d'électricité en Amérique du Nord, les capacités énergétiques que recèle la digestion anaérobie des déjections du bétail ont attiré l'attention des exploitants agricoles. Cette ressource énergétique est basée sur la fraction méthane des biogaz produits par dégradation anaérobie.

Lapp et al.[1] ont été les premiers à proposer l'adoption de la digestion anaérobie dans les fermes pour parvenir à l'autosuffisance énergétique et compenser l'augmentation des coûts de l'énergie provoquée par l'embargo pétrolier de 1973. Bien qu'on ait affirmé que la récupération dans les fermes de l'énergie produite par les systèmes anaérobies n'influerait pas de façon significative sur le bilan énergétique national global[2], cette récupération peut avoir une certaine importance économique pour certaines exploitations agricoles[3, 4]. Au Canada, le ministère fédéral de l'Agriculture accorde des subven-

nologies in the agricultural sector. Several provincial governments have similar programs managed through their agricultural ministries. This assistance has been provided in the construction and monitoring of several farm-scale systems(5).

For intensive livestock operations, the storage and handling of large quantities of animal waste material may pose a problem. This problem is further intensified in low land base regions. In addition, primarily due to the rapid expansion of urban centres, the rural-urban interface is narrowing. As a result, pollution control and odour reduction are becoming an increasingly significant concern of livestock producers. Anaerobic digestion reduces the environmental impact of agricultural wastes through the stabilization of livestock manure, and results in a significant reduction of odour. Urban encroachment on agricultural lands, the potential for an increasing enforcement of environmental codes of practice, as well as "nuisance litigation", make it clear that the benefits of anaerobic treatment systems must not be ignored.

The recovery of protein feed supplements from digester effluent has been projected as a significant source of cost reduction in the instal-

tions pour le développement de techniques énergétiques efficaces dans le secteur agricole. Plusieurs gouvernements provinciaux disposent de programmes semblables qui sont administrés par le ministère de l'Agriculture dont ils relèvent. Une telle aide a été fournie pour la construction et la surveillance de plusieurs systèmes(5) à l'échelle agricole.

Dans le cas de grands élevages, le stockage et la manutention de quantités très importantes de déjections animales peut poser un problème. La question est encore plus complexe dans les régions où la superficie des terres est limitée. En outre, principalement à cause de l'expansion rapide des centres urbains, la zone de transition entre les régions rurales et urbaines rétrécit. Par conséquent, les problèmes de contrôle de la pollution et de réduction des odeurs nauséabondes préoccupent de plus en plus les éleveurs. La digestion anaérobie réduit les répercussions des déchets agricoles sur l'environnement par la stabilisation du fumier, ce qui entraîne une réduction importante des odeurs. Il est évident que les avantages des systèmes de traitement anaérobie ne peuvent être négligés, étant donné le grignotage des terres agricoles par les villes, la possibilité d'une application plus stricte des codes environnementaux de bonne pratique et des poursuites en justice pour "nuisance".

La récupération de suppléments protéiniques alimentaires des effluents des digesteurs a été proposée comme source importante de réduction des coûts rendue possible par

lation of an anaerobic system. The recovered material has been promoted as an alternative to the conventional ration ingredients for livestock feeding.

For the agricultural sector, anaerobic digestion is a method to reduce odour and achieve some pollution control. Anaerobic digestion attracts interest in the agricultural sector because of its energy producing potential, and the cost savings associated with the recovery of protein and phosphorus feed supplements.

3.2 Waste Characteristics

3.2.1 Types of Animal Wastes. In addition to the feces and urine of livestock manures, farm wastes contain bedding material and other inorganic (cement dust, grit) and organic (spilled feed) components. The influent to an on-farm anaerobic reactor may consist of all of these farm wastes from either cattle (beef or dairy), swine, or poultry operations. The full-scale and experimental-scale reactors presently treating cattle, swine, and poultry waste in North America are listed by Pohland and Harper[6].

The distribution of full-scale digesters within the agricultural community is shown in Figure 1. Since there are more cattle farms than any

l'installation d'un système anaérobie. On propose l'utilisation des matières récupérées comme solution de rechange aux méthodes courantes basées sur les ingrédients des rations alimentaires du bétail.

Dans le secteur agricole, la digestion anaérobie est un moyen d'atténuer les odeurs et de pratiquer une certaine forme de lutte contre la pollution. La digestion anaérobie suscite beaucoup d'intérêt dans le secteur agricole à cause de son potentiel de production d'énergie et des économies que permet la récupération de suppléments alimentaires de protéines et de phosphore.

3.2 Caractéristiques des déchets

3.2.1 Types de déchets agricoles. - En plus des déjections solides et liquides qui constituent le fumier, les déchets agricoles contiennent des matières provenant de la litière et des composés inorganiques (poussière de ciment, gravier) et organiques (aliments déversés). L'influent d'un digesteur anaérobie de ferme peut être constitué de tous ces déchets agricoles provenant de l'élevage du bétail (bovins ou vaches laitières), des porcs ou de la volaille. Pohland et Harper[6] énumèrent les différents types de digesteurs expérimentaux et à grande échelle présentement disponibles pour traiter ces déchets en Amérique du Nord.

La figure 1 indique la distribution des digesteurs à grande échelle dans la communauté agricole. Étant donné que le nombre de fermes d'élevage de bovins prédomine, le

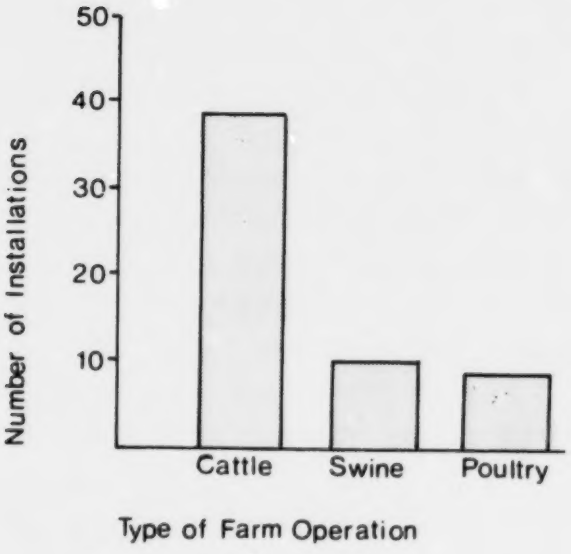


FIGURE 1 NUMBER OF FULL-SCALE ANAEROBIC TREATMENT INSTALLATIONS IN NORTH AMERICAN AGRICULTURE VERSUS TYPE OF FARM OPERATION

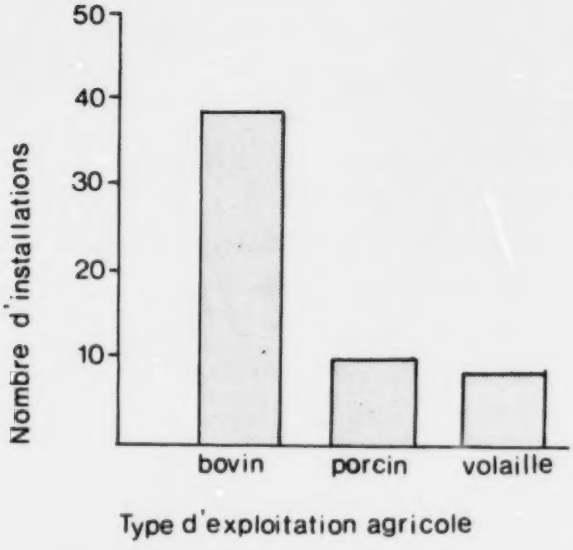


FIGURE 1 COMPARAISON ENTRE LE NOMBRE D'INSTALLATIONS DE TRAITEMENT ANAÉROBIE À GRANDE ÉCHELLE DANS L'INDUSTRIE AGRICOLE NORD-AMÉRICAINE ET LE TYPE D'EXPLOITATION AGRICOLE

other type of farm operation, anaerobic treatment of cattle waste has received more attention than either swine or poultry wastes. In Canada, the application of anaerobic systems is more evenly distributed between cattle and swine manures when compared to the overall North American scenario. Anaerobic systems treating poultry manures have not been as extensively developed, with no full-scale systems presently operating solely on poultry manure in Canada.

traitement anaérobie des déchets de ce type d'élevage a reçu plus d'attention que celui du traitement des déchets d'élevage des porcs ou de la volaille. L'utilisation des systèmes anaérobies pour traiter le fumier des bovins et des porcs est répartie plus également au Canada que dans le reste de l'Amérique du Nord. Les systèmes de traitement anaérobie des déchets d'élevage de la volaille n'ont pas encore atteint un développement équivalent, étant donné qu'il n'y a actuellement pas, au Canada, de système à grande échelle pour le traitement des déjections de la volaille.

There are several factors which influence the characteristics of cattle, swine, and poultry wastes. These factors include the digestive process of the animal, the feed composition, and the site-specific waste handling practices on the farm. In considering an agricultural waste for anaerobic treatment, the most relevant characteristics are solids content and waste composition.

The untreated wastes produced by cattle and poultry operations can typically be expected to have a dry matter solids content greater than 10%. Since the operational requirements of an anaerobic reactor dictate that the total solids content should not exceed 10% in most cases[7], these farm wastes must be diluted prior to treatment. The effect of feed composition on the total solids (TS) content of cattle waste has been evident at the Cattleland Ontario installation. The high moisture feedstuffs include food processing by-products such as whey and cull potatoes. As a result, the beef feedlot manure has a lower total solids content than is typically expected of beef manures[8].

In terms of waste composition, the nitrogen and lignin content of

Plusieurs facteurs influent sur les caractéristiques des déchets d'élevage des bovins, du porc et de la volaille. Citons entre autres le processus digestif de l'animal, la composition des aliments et les pratiques de manutention des déchets propres à chaque exploitation agricole. Les caractéristiques les plus pertinentes des déchets agricoles destinés au traitement anaérobie sont leur teneur en matières solides et leur composition.

Avant traitement, les déchets produits par les élevages de bétail et de volaille ont en général des teneurs en matières solides sèches supérieures à 10 p. 100. Étant donné que, conformément aux exigences opérationnelles des digesteurs anaérobies, la teneur en matières solides totales ne doit pas dépasser 10 p. 100 dans la plupart des cas[7], ces déchets agricoles doivent être dilués avant traitement. Les effets de la composition de l'alimentation du bétail sur la teneur en matières solides des déjections sont manifestes dans l'exploitation agricole Cattleland Ontario. Les aliments pour animaux, dont la teneur en eau est élevée, comprennent des sous-produits de traitement, comme le petit-lait et les rejets de pommes de terre. Il en résulte que le fumier des bovins des parcs d'engraissement ont une plus faible teneur en matières solides totales que celle qu'on observe généralement dans le fumier des bovins[8].

En ce qui a trait à la composition des déchets, les teneurs en azote et en lignine du

animal manures are two characteristics relevant to anaerobic treatability. Pig and poultry manures are characterized by a higher nitrogen content than either beef or dairy cattle manures. According to Stafford et al.(2), the nitrogen content of swine manure is 0.9 g/kg compared to 0.4 g/kg for cattle manure. In the operation of an on-farm anaerobic system, the acclimation of bacteria to the concentrations of ammonia produced by a high nitrogen content must be considered. The lignin content of animal manures may contribute to the development of a scum which reduces digester circulation and biogas evolution. The principle sources of lignin in animal manures are the feedstuff, and the bedding material. Since lignin is a fibre which is highly resistant to attack by anaerobic microorganisms(9), it will pass through a digester unchanged.

One additional treatability characteristic of swine manure is the tendency of this waste to separate quickly into a settled sludge, a suspended slurry, and a surface crust upon standing(10). At Gasser Farms Ltd., where swine manure was used to supplement the dairy cattle manure influent, it was suggested that the

fumier des animaux sont les deux caractéristiques à considérer lorsqu'on envisage de leur faire subir un traitement anaérobie. Le fumier des porcs et de la volaille est caractérisé par une teneur en azote plus forte que celle du fumier des bovins d'élevage ou des vaches laitières. Selon Stafford et al.(2), la teneur en azote du fumier de porc est de 0,9 g/kg, alors qu'elle est de 0,4 g/kg pour le fumier du bétail. Dans les conditions d'exploitation des systèmes anaérobies des fermes, l'acclimatation des bactéries aux concentrations d'ammoniac produites par la forte teneur en azote doit être prise en considération. La teneur en lignine du fumier des animaux peut entraîner la formation d'une écume qui entrave la circulation dans le digesteur et la libération du biogaz. Les principales sources de lignine des déchets agricoles sont les aliments et les matières servant de litière. La lignine est une fibre très résistante aux attaques des microorganismes anaérobies(9) et n'est pas altérée par son passage à travers le digesteur.

Le fumier de porcs a pour autre caractéristique d'avoir tendance, pendant le traitement, à se séparer rapidement et à former une boue sédimentée, une bouillie en suspension et, avec le temps, une croûte en surface(10). À Gasser Farms Ltd., où le fumier de porcs est ajouté au fumier de vaches laitières, il a été suggéré que la séparation du fumier de porcs pouvait avoir provoqué l'accu-

segregation of the swine manure could have been a factor in the scum accumulation which occurred in the digester corners[8].

3.2.2 Collection Methods/Pretreatment Practices. The physical variation of manure is such that manure handling systems are difficult to engineer with precision. It is important that a proven manure handling system is integrated with the installation of an anaerobic treatment system. The system must be reliable and labour-efficient in order to be accepted by the livestock producer.

In most instances, fresh manure is either positively pumped, mechanically scraped, hydraulically flushed or flows by gravity from the confinement building[11]. Pig slurry is normally collected in channels under slats, or flushed to a holding tank from which it may be pumped into an anaerobic reactor. A similar approach was used at the 4000 head beef feedlot at Cattleland Ontario, and at the intensive dairy operation at Pittens Farm. In addition to the use of liquid flushing systems, other pretreatment practices include the addition of wash water from milking operations to dairy manures, and prescreening to remove coarse solids. At Cattleland, coarse solids are removed for composting

mulation d'écume observée dans les coins du digesteur[8].

3.2.2 Méthodes de collecte et de prétraitement. - Le fumier peut présenter des aspects si divers qu'il est difficile de mettre au point avec précision des systèmes de manutention. Lors de l'installation d'un système de traitement anaérobie, il est important d'y intégrer un système de manutention du fumier ayant fait ses preuves. Pour être accepté par les éleveurs, ce système doit être fiable et exiger peu de main-d'oeuvre.

Dans la plupart des cas, le fumier frais est aspiré par des pompes, recueilli par un dispositif de raclage mécanique ou par poussée hydraulique, ou encore est acheminé par gravité jusqu'au bâtiment de confinement[11]. La bouillie de fumier de porcs est normalement recueillie dans des dallots sous des grilles ou poussée par un jet d'eau jusqu'à un réservoir à partir duquel elle peut être pompée jusqu'au digesteur anaérobie. Une méthode semblable a été utilisée dans les parcs d'engraissement de bovins de 4000 têtes de Cattleland Ontario, et à la grande exploitation laitière de Pittens Farm. En plus de systèmes de lavage par jet d'eau, il existe d'autres techniques de pré-traitement comme l'ajout, au fumier des vaches laitières, de l'eau de rinçage des réservoirs de lait, ainsi que le prétamisage pour éliminer les matières solides

prior to the digestion of the liquid fraction. In existing cattle manure handling systems cattle wastes are more likely to be scraped from a floor or dirt feedlot.

Animal manure is a balanced organic material containing sufficient quantities of the essential nutrients required for the anaerobic conversion process. In full-scale systems, chemical pretreatment of cattle and swine manures has not been necessary.

Manure is excreted from animals at nearly the optimum temperature for anaerobic treatment. However, this temperature is not maintained during manure-handling practices. As a result, thermal pretreatment of animal manures may be necessary to raise the temperature of the digester influent. Thermal pretreatment supplements the internal heating systems used to maintain the operating temperature of an anaerobic reactor.

In application, manure preheating is achieved through an influent/effluent heat exchanger, or the use of engine heat reclaimed from co-generation. At Cattleland Ontario[12], the digester influent is prewarmed by the injection of steam.

grossières. À Cattleland, avant le compostage, les matières solides grossières sont éliminées avant la digestion de la fraction liquide. Dans les systèmes actuels de manutention du fumier de bétail, les déchets sont le plus souvent recueillis par raclage du plancher ou du sol du parc d'engraissement.

Le fumier des animaux est composé de matières organiques équilibrées et il contient une quantité suffisante d'éléments nutritifs essentiels requis pour le processus de conversion anaérobie. Dans les systèmes à grande échelle, un pré-traitement chimique du fumier de porcs et de bovins n'est pas nécessaire.

Le fumier est excrété par les animaux à une température presque optimale pour le traitement anaérobie, mais cette température n'est pas maintenue pendant sa manutention. Par conséquent, un pré-traitement thermique du fumier peut être nécessaire pour élever la température de l'influent du digesteur. En outre, il facilite le fonctionnement de systèmes internes de chauffage servant à maintenir la température de fonctionnement du digesteur anaérobie.

En pratique, le préchauffage du fumier est obtenu à l'aide d'un échangeur de chaleur influent-effluent ou par l'utilisation de la chaleur récupérée des machines. À Cattleland Ontario[12], l'influent du digesteur est préchauffé par injection de vapeur. Aux installations de recherche de Kemptville

At the Kemptville College research installation, influent is blended with recirculated slurry in the ratio of 1:3 for prewarming before entering the heated digester(13).

3.3 Process Systems and Performance

3.3.1 Digester Design. Due to the characteristics of agricultural wastes, plug-flow and complete-mix digesters have been preferred over the high-rate reactors. In North America, 80% of the anaerobic systems treating cattle waste are plug-flow reactors, while the remaining 20% are primarily complete-mix digesters(6). In Canada, the most commonly used reactor type is the complete-mix digester, with up to 60% of all agricultural anaerobic installations using this reactor configuration. The only known plug-flow (tunnel) digester constructed in Canada is being used in the treatment of dairy cattle manure at Gasser Farms Ltd.(14) A field scale 38 m^3 fixed-film reactor is used on the Folkema hog farm(15), but use of the high-rate, fixed-film digester has otherwise been limited to the research facilities at the Kemptville College of Agricultural Technology, and the Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ). A review submitted to Agriculture Canada, and the

College, l'influent est mélangé avec de la boue recirculée dans un rapport de 1 à 3 pour un préchauffage avant son introduction dans le digesteur chauffé(13).

3.3 Systèmes de traitement et performances

3.3.1 Conception du digesteur. - Étant donné les caractéristiques des déchets agricoles, des digesteurs à flux piston et à mélange intégral sont utilisés de préférence aux digesteurs à forte charge. En Amérique du Nord, 80 p. 100 des systèmes anaérobies traitant les déchets d'élevage du bétail sont des réacteurs à flux piston, alors que les autres (20 p. 100) sont surtout des digesteurs à mélange intégral(6). Au Canada, le type de digesteur le plus communément utilisé est le digesteur à mélange intégral, et plus de 60 p. 100 des installations agricoles anaérobies en sont équipées. Le seul exemple de digesteur à flux piston (tunnel) connu et construit au Canada est celui utilisé pour le traitement du fumier de vaches laitières chez Gasser Farms Ltd.(14). Un réacteur à lit bactérien à grande échelle de 38 m^3 est utilisé dans le parc d'engraissement de porcs de Folkema(15), mais l'utilisation de digesteurs à lit bactérien à forte charge a été limitée aux installations de recherche du Kemptville College of Agricultural Technology, ainsi qu'au Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). Une étude présentée à Agriculture Canada et, en Ontario, au ministère de l'Énergie et à celui de

Ontario Ministries of Energy, and Agriculture and Food has evaluated the on-farm experience of all Canadian anaerobic installations, including discussions of the system features[8].

The size of the agricultural digesters has been variable, ranging from small reactors with an active volume of 25 to 50 m^3, up to very large reactors (900 to 1200 m^3). However, as many as 70% of the existing digesters are within an intermediate range of 100 to 800 m^3. The sizing of a digester is a design parameter dependent on other features of the system, such as the hydraulic retention time (HRT), and the quantity of waste to be used as digester influent. The HRT of the conventional digesters used is typically 10 to 25 days, with a loading rate range of 3 to 7 kg votatile solids (VS)/$m^3 \cdot d^{-1}$.

Internal heating systems are used to maintain the optimal thermal environment for anaerobic bacteria in a reactor. While thermophilic digestion of cattle waste has been studied at lab-scale[16], a mesophilic operating temperature is more commonly used to minimize the energy requirements of digester operation. At Cattleland Ontario, the system was originally designed to operate thermophilically, but has been found to

l'Agriculture et de l'Alimentation, a évalué l'exploitation de toutes les installations anaérobies au Canada, et a examiné les caractéristiques des systèmes[8].

Les digesteurs agricoles ont des tailles variées, allant des petits réacteurs ayant un volume utile de 25 à 50 m^3, aux très gros réacteurs de 900 à 1200 m^3. Toutefois, près de 70 p. 100 des digesteurs utilisés sont de taille moyenne (100 à 800 m^3). Les dimensions à donner à un digesteur sont fonction de certaines caractéristiques du système, par exemple le temps de rétention hydraulique (TRH), ainsi que la quantité de déchets qui entrent dans le digesteur. Le TRH des digesteurs moyens est ordinairement de 10 à 25 jours, et le taux de charge est compris entre 3 à 7 kg de matières solides volatiles (MSV/$m^3 \cdot d^{-1}$).

Les digesteurs sont équipés d'un système de chauffage interne qui maintient un environnement thermique optimal pour les bactéries anaérobies. Bien que la digestion par les bactéries thermophiles des déchets agricoles ait été étudiée à l'échelle expérimentale[16], il est plus courant d'opérer dans la plage mésophile, car cela réduit la demande énergétique du digesteur. À Cattleland Ontario, le système a été conçu à l'origine pour fonctionner dans des conditions thermophiles, mais on a constaté qu'il fonctionnait aussi bien

operate equally well at a mesophilic temperature of 35°C. Studies at 10 and 15°C have shown digestion will occur at these temperatures, but at a slower rate.

In the practice of co-generation, the heat reclaimed from the internal combustion engine coolant and exhaust gas may be used to maintain the temperature of the digester slurry. In addition to heat exchangers, liquefied petroleum gas (LPG) and biogas boilers have been used to maintain the internal operating temperature of the anaerobic reactor.

In the complete-mix reactor, a mixing system is incorporated into the design of the digester. Mixing is used to maximize the rate of biological reaction by bringing organisms into continuous contact with the organic material. Mixing also accomplishes a number of other functions such as: maintenance of a uniform temperature, dispersion of volatile acids, and the prevention of scum formation.

Since the optimum quantity of mixing varies, mixing may occur either continuously or intermittently. Effective mixing has been accomplished in a variety of ways. Based on North American experience, the most common mixing technique has been the use of submersible mixers. Located within the digester tank,

à une température de 35 °C (plage mésophile). Des études ont démontré que la digestion s'effectue à 10 °C et 15 °C, mais plus lentement.

Dans les systèmes de récupération de chaleur, la chaleur du système de refroidissement du moteur à combustion et des gaz d'échappement peut être utilisée pour maintenir la température de la bouillie du digesteur. En plus des échangeurs de chaleur, du gaz de pétrole liquéfié (GPL) et des chaudières à biogaz ont été utilisés pour maintenir la température de fonctionnement interne du digesteur anaérobie.

Les digesteurs à mélange intégral comportent un système de brassage incorporé qui favorise la réaction biologique en assurant un contact continu entre les bactéries et les matières organiques. Le mélange permet, en autres, de maintenir une température uniforme, de disperser les acides volatils et d'empêcher la formation d'écume.

Étant donné que la quantité optimale de mélange varie, le brassage peut être soit continu, soit intermittent. Un brassage efficace peut être obtenu de diverses façons. Si l'on se base sur l'expérience nord-américaine, la technique de brassage la plus commune est l'utilisation de dispositifs submergés. Situés à l'intérieur du réservoir du digesteur, ces mélangeurs submergés sont

these submersible mixers are either side-mounted on the tank, or situated on a main mast. If the mixing equipment requires servicing, the system must be shut down to allow access to the mixer. Top-mounted mixers have also been used, with mixing efficiency promoted by vertical baffles in the digester. Although vertical shaft mixers are easily serviced, maintaining a good gas seal is the main concern when using this mixing technique. Other designs incorporate external recirculation pumps to achieve effective mixing within the digester.

In the high-rate DSFF reactor, a packing material is needed as a fixed medium for the attachment and growth of anaerobic bacteria. At CRIQ, a special packing material has been developed[17]. The material, manufactured from recycled plastic materials, is an extruded 100-mm diameter PVC tubing which is mechanically roughened to create an improved surface for bacterial adhesion. To eliminate the possibility of clogging, the design was changed from a honeycomb configuration to a central cross. Loading rates as high as 12 to 15 kg $VS/m^3 \cdot d^{-1}$ have been achieved when using this material in bench-scale reactors[18]. Both of the full-scale digesters at Folkema Farm

montés sur la paroi du réservoir ou sont situés sur l'axe principal. Si le matériel de brassage nécessite de l'entretien, il faut arrêter le digesteur pour avoir accès au mélangeur. On a également utilisé des mélangeurs montés sur la partie supérieure, dont l'efficacité de brassage est accrue par des chicanes verticales placées dans le digesteur. Bien que les mélangeurs à arbre vertical soient faciles à entretenir, il faut veiller à ce qu'ils soient étanches aux gaz. D'autres modèles comportent des pompes extérieures à recirculation des boues qui permettent d'obtenir un mélange efficace à l'intérieur du digesteur.

Dans un réacteur à lit bactérien à courant descendant, à forte charge, un matériau de remplissage doit être utilisé comme milieu de fixation et de croissance des bactéries anaérobies. Au CRIQ, un matériau de remplissage spécial a été mis au point[17]. Ce matériau, à base de matières plastiques recyclées, constitue des canalisations en PCV de 100 mm de diamètre dont la surface a été rendue rugueuse pour permettre une meilleure fixation des bactéries. Afin d'éliminer la possibilité de colmatage, le modèle est passé d'une configuration en nid d'abeilles à une configuration en croix grecque. Des vitesses de charge atteignant jusqu'à 12 à 15 kg $MSV/m^3 \cdot d^{-1}$ ont été obtenues avec l'utilisation de ce matériau dans les réacteurs à grande échelle[18]. Les deux digesteurs à grande échelle de Folkema Farm et du Kemptville College ont été utilisés

and Kemptville College have used the material[19]. After several months of operation, there was no evidence of clogging or short-circuiting in the treatment of swine waste at Folkema. The fixed-film digester at Kemptville, however, experienced such extensive problems associated with gas entrapment and clogging that the media was removed for continued operation as a complete-mix reactor. These problems may be entirely associated with the high total solids content of the beef manure being treated at Kemptville.

3.3.2 Biogas Production and Quality. The volume of biogas produced per kilogram of agricultural waste is dependent upon many factors, including the digester operating temperature, mixing practices and the loading rate to the digester. Biogas production for various classes of livestock and poultry manures has been estimated by Lapp[11] according to animal live weight and digester volume. More recently, Pohland and Harper[6] have generalized a specific gas ratio of 1 to 3 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ (expressed as volume of gas per reactor volume per day) for cattle waste, compared to 1 to 2 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ resulting from the anaerobic treatment of swine manures. The gas produced in an anaerobic

avec ce matériau[19]. Après plusieurs mois de fonctionnement, il n'y avait aucun signe de colmatage ou de court-circuitage dans le traitement des déchets d'élevage des porcs à Folkema. Toutefois, dans le cas du digesteur à lit bactérien de Kemptville, les gaz piégés et le colmatage du matériau ont causé de tels problèmes que le milieu a été retiré pour permettre l'exploitation en continu du réacteur, en tant que digesteur à mélange intégral. Ces problèmes pourraient tous s'expliquer par la forte teneur en matières solides totales du fumier de bovins traité à Kemptville.

3.3.2 Production et qualité du biogaz. - Le volume de biogaz par kilogramme de déchets agricoles dépend de nombreux facteurs, y compris de la température de fonctionnement du digesteur, des méthodes de brassage et de la charge du digesteur. La production de biogaz de diverses catégories de fumier de bétail et de volaille a été évaluée par Lapp[11], qui s'est basé sur le poids vif de l'animal et le volume du digesteur. Plus récemment, Pohland et Harper[6] ont généralisé un rapport spécifique de production de gaz de 1 à 3 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ (exprimé en volume de gaz par volume du réacteur par jour) pour les déchets d'élevage du bétail, comparativement à 1 à 2 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ pour le traitement anaérobie du fumier de porcs. Le gaz produit dans un réacteur anaérobie peut permettre de mesurer le rendement du

reactor can be taken as a measure of the digester's performance. A drop in production is an indicator of problems in system operation.

One optimistic estimate suggests that the gas production per unit volume of digester attainable with the fixed-film design is up to four times greater than the conventional stir tank reactor. On the Folkema hog farm, the fixed-film reactor has achieved high specific gas ratios of 0.9 to 2.6 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$, with production rates varying from 35 to 100 m^3/d depending on feed rate and manure availability. Before operational difficulties were experienced at Kemptville, a specific gas ratio of 1.1 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ was achieved in the fixed-film reactor(19).

There is some speculation that the feed rations may account for differences noted in gas production and manure digestability. A much lower specific production ratio was obtained on the Linden Lee Farms Ltd.(20), when compared to the Selves Farms Ltd. unit which is of the same design. The average was 0.3 m^3/kg $VS \cdot d^{-1}$ compared to 0.7 m^3/kg $VS \cdot d^{-1}$ at the Selves unit(21). Selves feeds a high moisture corn and soybean meal ration while Linden Lee Farms feeds a

digesteur. Une baisse de production indique des problèmes de fonctionnement du système.

Selon une évaluation optimiste, la production de gaz par unité de volume du digesteur qu'on peut obtenir avec un modèle à lit bactérien est jusqu'à quatre fois plus grande que celle d'un réacteur ordinaire à brassage. Au parc d'engraissement de porcs de Folkema, le réacteur à lit bactérien a atteint de forts rapports spécifiques de production de gaz de 0,9 à 2,6 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$, et les taux de production sont compris entre 35 et 100 m^3/d selon la vitesse d'alimentation et la disponibilité du fumier. Avant les problèmes observés à Kemtpville, un rapport spécifique de production de gaz de 1,1 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ a été atteint dans le réacteur à lit bactérien (19).

Certains pensent que les différences dans l'alimentation du bétail peuvent expliquer les différences observées dans la production de gaz et les caractéristiques de digestibilité du fumier. Un rapport spécifique de production de gaz beaucoup plus faible a été obtenu à Linden Lee Farms Ltd.(20), comparativement à celui de l'unité de Selves Farms Ltd. du même modèle. La première a obtenu une valeur moyenne de 0,3 m^3/kg $MSV \cdot d^{-1}$ par rapport à une valeur de 0,7 m^3 pour l'unité de Selves(21). La base de l'alimentation du bétail de l'unité Selves est la moulée de maïs et de soya à forte

barley or wheat and heat-treated soybean ration.

The composition of biogas produced by the anaerobic digestion of agricultural wastes is typically 60 to 70% methane (CH_4) and 30 to 40% carbon dioxide (CO_2). It may also contain small quantities of carbon monoxide (CO), hydrogen (H_2), hydrogen sulphide (H_2S), nitrogen, oxygen and water vapour. These impurities require specific design and operational considerations.

Carbon dioxide while having no harmful or damaging effects, creates a sluggish rate of burn when biogas is being used as a fuel. In order to compensate for the slower burning characteristics resulting from the presence of CO_2, the timing of natural gas engines has been advanced, with engine efficiency derated by approximately 10%. Also, the orifice size should be increased and the air entrainment port(s) decreased when burning biogas in natural gas or propane equipment. Further information has been provided by Pos[22]. At the present time, the costs of a CO_2 scrubber are not justifiable, since satisfactory performance has been achieved by compensating adjustments in burners and engines.

teneur en eau, alors que celle des Linden Lee Farms est la moulée d'orge et de blé et de fèves soya traitées thermiquement.

Le biogaz produit par digestion anaérobie des déchets agricoles contient ordinairement de 60 p. 100 à 70 p. 100 de méthane (CH_4) et 30 p. 100 à 40 p. 100 de dioxyde de carbone (CO_2). Il peut également contenir de petites quantités de monoxyde de carbone (CO), d'hydrogène (H_2), de sulfure d'hydrogène (H_2S), d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau. Ces impuretés rendent nécessaires une conception et des méthodes d'exploitation un peu particulières.

Bien qu'il n'ait pas d'effets nocifs ou corrosifs, le dioxyde de carbone ralentit la combustion lorsque le biogaz sert de combustible. Afin de compenser ce phénomène, il faut avancer le cycle d'allumage des moteurs à gaz naturel tout en acceptant une perte d'efficacité d'environ 10 p. 100. De plus, les dimensions de l'orifice doivent être augmentées et la ou les ouverture(s) d'admission d'air doivent être diminuées si l'on brûle du biogaz dans un équipement conçu pour le gaz naturel ou le gaz propane. Des informations supplémentaires sont fournies par Pos[22]. Actuellement, le coût d'un épurateur de CO_2 n'est pas justifié, étant donné qu'on a obtenu un rendement satisfaisant par des réglages compensatoires des brûleurs et des moteurs.

Typically, the percentage of hydrogen sulphide in biogas is variable from less than 0.1% up to 2.0%[23]. To some extent, the H_2S content depends on the sulphur content of the feed ration, the type of animal, and the operating conditions of the digester. Due to its corrosive nature, H_2S is an undesirable impurity in biogas. Field observations indicate that copper and galvanizing materials are the most vulnerable to H_2S corrosion. At Fallis Farms, the first digester to operate in Canada on swine manure, significant problems were associated with H_2S corrosion. The corrosion of the temperature recorder terminals, the gas meter, and the copper controller sensor line was attributed to the presence of H_2S caused by locating the biogas boiler directly over the digester[24]. The system was continually modified until the heat exchanger pipes corroded and started to leak in 1984. On the Evan Leefer Farm, a 1000 head beef cattle operation, one incidence of influent overloading caused foaming and allowed H_2S to reach the compressor. System recovery from the resulting failure was established within two weeks[25].

In anticipation of the necessity of hydrogen sulphide removal, research personnel at CRIQ have been

Le pourcentage ordinaire de sulfure d'hydrogène dans le biogaz varie de moins de 0,1 p. 100 à plus de 2,0 p. 100[23]. Jusqu'à un certain point, la teneur en H_2S dépend de la teneur en soufre de la ration alimentaire, du type d'animal ainsi que des conditions d'exploitation du digesteur. Le H_2S est corrosif; il est donc une impureté du biogaz. Des observations sur place indiquent que le cuivre et les produits galvanisés sont ceux qui sont les plus vulnérables à la corrosion par le H_2S. À Fallis Farms, où est installé le premier digesteur utilisant du fumier de porcs au Canada, on a noté d'importants problèmes dus à la corrosion par le H_2S. La corrosion des bornes de l'enregistreur de températures, du compteur à gaz et du tuyau en cuivre du capteur du dispositif de contrôle a été attribuée à la présence de H_2S, du fait que la chaudière à biogaz est située au-dessus du digesteur[24]. Le système a été modifié continuellement jusqu'à ce que la tuyauterie de l'échangeur de chaleur se soit corrodée et ait commencé à fuir en 1984. Dans les installations d'Evan Leefer Farm, qui compte mille têtes de bovins, une surcharge d'influent a entraîné la formation de mousse et le H_2S a atteint le compresseur. Après la panne qui a suivi, on a pu revenir à la capacité antérieure en moins de deux semaines[25].

En prévision de la nécessité d'éliminer le sulfure d'hydrogène, les chercheurs du CRIQ travaillent à une nouvelle formulation à base

working on a revised ferrous oxide formulation. Part of the work at the Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAF) Research Station is devoted to gas cleaning and scrubbing practices[22]. Lapp[11] describes an iron sponge scrubber that provides a simple and economical method of H_2S removal. Other commercial methods, such as the monoethanolamine (MEA) process used in the natural gas industry, are effective but are deemed too costly for farm use. Caustic scrubbing, solid absorption, liquid absorption and pressure separation do not show economic or practical benefits for on-farm biogas production systems.

In addition to hydrogen sulphide, the water vapour component of biogas may cause some operational difficulties. The water vapour should be condensed out of the system to prevent the freezing of gas lines in winter and/or damage to mechanical parts. This can be accomplished using a cooling heat exchanger on a vertical gas pipe, with the condensate collected and removed from water traps. On the Gasser Farms Ltd. system, line sag in the PVC piping caused condensed water to restrict gas flow. As a consequence, all lines were changed to large diameter steel and appropriately sloped to water traps

d'oxyde ferreux. Une partie des travaux à la Station de recherche du ministère ontarien de l'Agriculture et de l'Alimentation (MOAA) porte sur l'épuration du gaz et l'élimination des particules[22]. Lapp[11] décrit un système d'épurateurs à base de fer spongieux qui permet une élimination simple et économique du H_2S. D'autres méthodes commerciales comme le procédé à la monoéthanolamine (MEA), utilisées dans l'industrie du gaz naturel, sont efficaces mais semblent être trop coûteuses pour être utilisées dans les fermes. Le lavage à la soude caustique, l'adsorption des matières solides, l'absorption des liquides ainsi que la séparation sous pression ne semblent ni assez économiques ni assez pratiques pour les systèmes de production de biogaz des fermes.

Non seulement le sulfure d'hydrogène que contient le biogaz peut entraîner certaines difficultés d'exploitation, mais la vapeur d'eau aussi. Celle-ci doit être retirée du système par condensation pour éviter le gel des canalisations de gaz en hiver et(ou) l'endommagement des parties mécaniques. Cela peut être accompli à l'aide d'un échangeur de chaleur qu'on place sur une canalisation de gaz verticale et qui, par refroidissement, élimine le condensat s'accumulant dans le piège à eau. Dans le système de Gasser Farms Ltd., un fléchissement de la canalisation en PCV a provoqué la condensation de l'eau, d'où une diminution du débit du gaz. Par la suite, toutes les canalisations ont été remplacées par des tubes en

Typically, the percentage of hydrogen sulphide in biogas is variable from less than 0.1% up to 2.0%[23]. To some extent, the H_2S content depends on the sulphur content of the feed ration, the type of animal, and the operating conditions of the digester. Due to its corrosive nature, H_2S is an undesirable impurity in biogas. Field observations indicate that copper and galvanizing materials are the most vulnerable to H_2S corrosion. At Fallis Farms, the first digester to operate in Canada on swine manure, significant problems were associated with H_2S corrosion. The corrosion of the temperature recorder terminals, the gas meter, and the copper controller sensor line was attributed to the presence of H_2S caused by locating the biogas boiler directly over the digester[24]. The system was continually modified until the heat exchanger pipes corroded and started to leak in 1984. On the Evan Leefer Farm, a 1000 head beef cattle operation, one incidence of influent overloading caused foaming and allowed H_2S to reach the compressor. System recovery from the resulting failure was established within two weeks[25].

In anticipation of the necessity of hydrogen sulphide removal, research personnel at CRIQ have been

Le pourcentage ordinaire de sulfure d'hydrogène dans le biogaz varie de moins de 0,1 p. 100 à plus de 2,0 p. 100[23]. Jusqu'à un certain point, la teneur en H_2S dépend de la teneur en soufre de la ration alimentaire, du type d'animal ainsi que des conditions d'exploitation du digesteur. Le H_2S est corrosif; il est donc une impureté du biogaz. Des observations sur place indiquent que le cuivre et les produits galvanisés sont ceux qui sont les plus vulnérables à la corrosion par le H_2S. À Fallis Farms, où est installé le premier digesteur utilisant du fumier de porcs au Canada, on a noté d'importants problèmes dus à la corrosion par le H_2S. La corrosion des bornes de l'enregistreur de températures, du compteur à gaz et du tuyau en cuivre du capteur du dispositif de contrôle a été attribuée à la présence de H_2S, du fait que la chaudière à biogaz est située au-dessus du digesteur[24]. Le système a été modifié continuellement jusqu'à ce que la tuyauterie de l'échangeur de chaleur se soit corrodée et ait commencé à fuir en 1984. Dans les installations d'Evan Leefer Farm, qui compte mille têtes de bovins, une surcharge d'influent a entraîné la formation de mousse et le H_2S a atteint le compresseur. Après la panne qui a suivi, on a pu revenir à la capacité antérieure en moins de deux semaines[25].

En prévision de la nécessité d'éliminer le sulfure d'hydrogène, les chercheurs du CRIQ travaillent à une nouvelle formulation à base

working on a revised ferrous oxide formulation. Part of the work at the Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAF) Research Station is devoted to gas cleaning and scrubbing practices[22]. Lapp[11] describes an iron sponge scrubber that provides a simple and economical method of H_2S removal. Other commercial methods, such as the monoethanolamine (MEA) process used in the natural gas industry, are effective but are deemed too costly for farm use. Caustic scrubbing, solid absorption, liquid absorption and pressure separation do not show economic or practical benefits for on-farm biogas production systems.

In addition to hydrogen sulphide, the water vapour component of biogas may cause some operational difficulties. The water vapour should be condensed out of the system to prevent the freezing of gas lines in winter and/or damage to mechanical parts. This can be accomplished using a cooling heat exchanger on a vertical gas pipe, with the condensate collected and removed from water traps. On the Gasser Farms Ltd. system, line sag in the PVC piping caused condensed water to restrict gas flow. As a consequence, all lines were changed to large diameter steel and appropriately sloped to water traps

d'oxyde ferreux. Une partie des travaux à la Station de recherche du ministère ontarien de l'Agriculture et de l'Alimentation (MOAA) porte sur l'épuration du gaz et l'élimination des particules[22]. Lapp[11] décrit un système d'épurateurs à base de fer spongieux qui permet une élimination simple et économique du H_2S. D'autres méthodes commerciales comme le procédé à la monoéthanolamine (MEA), utilisées dans l'industrie du gaz naturel, sont efficaces mais semblent être trop coûteuses pour être utilisées dans les fermes. Le lavage à la soude caustique, l'adsorption des matières solides, l'absorption des liquides ainsi que la séparation sous pression ne semblent ni assez économiques ni assez pratiques pour les systèmes de production de biogaz des fermes.

Non seulement le sulfure d'hydrogène que contient le biogaz peut entraîner certaines difficultés d'exploitation, mais la vapeur d'eau aussi. Celle-ci doit être retirée du système par condensation pour éviter le gel des canalisations de gaz en hiver et(ou) l'endommagement des parties mécaniques. Cela peut être accompli à l'aide d'un échangeur de chaleur qu'on place sur une canalisation de gaz verticale et qui, par refroidissement, élimine le condensat s'accumulant dans le piège à eau. Dans le système de Gasser Farms Ltd., un fléchissement de la canalisation en PCV a provoqué la condensation de l'eau, d'où une diminution du débit du gaz. Par la suite, toutes les canalisations ont été remplacées par des tubes en

which are manually drained each day[8]. Parsons[26] discusses line selection and sizing in detail. At the Selves operation, the original commercial exhaust gas heat exchanger failed from corrosion caused by condensation, requiring the design and installation of a new heat exchanger on the engine exhaust.

3.3.3 Biogas Storage and Utilization. Energy utilization rates on most farms are characterized by high rates of use over short periods. Biogas production from anaerobic systems, however, is relatively steady over long periods. In comparison to other fuels such as propane, biogas cannot be practically liquified for long-term storage due to the high critical pressure of methane (4710 kPa @ -82°C). For these reasons, biogas storage, especially for short time intervals, is an integral part of the on-farm anaerobic system.

Generally, the equipment costs and the energy required for high pressure compression and storage have resulted in the use of short-term, low-pressure storage structures. Low pressure storage materials include butyl rubber, hypalon or polystyrene. At Gasser Farms[14, 27], five exposed

acier de grand diamètre ayant une pente appropriée et dirigés vers des pièges à eau qui sont vidés manuellement tous les jours[8]. Parsons[26] traite du choix et des dimensions des canalisations. Dans les installations de Selves, l'échangeur de chaleur commercial utilisant le gaz d'échappement est tombé en panne à cause de la corrosion causée par la condensation, ce qui a obligé à concevoir et à installer un nouvel appareil.

3.3.3 Stockage et utilisation du biogaz. - Dans la plupart des fermes, les taux de consommation d'énergie sont caractérisés par de fortes pointes pendant de courtes périodes. Toutefois, la production de biogaz des systèmes anaérobies est relativement régulière pendant de longues périodes. Contrairement à d'autres combustibles comme le propane, le biogaz ne peut pas être liquéfié de façon pratique et être stocké à long terme, à cause de la pression critique élevée du méthane (4710 kPa à -82 °C). Pour ces raisons, des dispositifs de stockage du biogaz spéciaux, pour de courtes périodes, doivent faire partie intégrante des systèmes anaérobies des fermes.

Généralement, les coûts de l'équipement et de l'énergie requis pour la compression et le stockage à pression élevée du biogaz obligent à utiliser un équipement de stockage à faible pression conçu pour de courtes périodes. Parmi les matériels de stockage à faible pression, citons le caoutchouc butyle, l'hypalon et le polystyrène. À Gasser Farms[14, 27], cinq sacs

28 m^3 bags of various materials were being tested under contract to Agriculture Canada. Site storage was provided by a 150 m^3 flexible bag inside a vented steel tank providing wind and snow protection. These bags provide inexpensive biogas storage; however, they are bulky and are affected by environmental conditions (wind, snow) if left unprotected.

At LEL Farms Ltd.[8], the digester is covered by a flexible membrane, with no provision for weather protection. If the wind blows, and the flexible cover is not fully inflated, air is blown in to prevent billowing. This addition of oxygen (air) has been identified as a cause of low quality biogas. The addition of a rigid frame cover was recommended to protect the flexible cover, and eliminate the need for the addition of air; thus improving the biogas quality. On the Folkema Farm[15], biogas is pumped to an outside flexible 80 m^3 bag covered by an 'A'-frame structure. Maximum gas pressure is 2.5 kPa. On the Foster Bros. dairy farm, the tunnel digester and flexible membrane cover were covered by a pole frame building to protect the system from wind and snow. At CRIQ, instrumentation was being put in place to monitor the gas

de 28 m^3 contenant divers matériaux ont été soumis à des essais conformément aux contrats passés avec Agriculture Canada. L'aire de stockage était protégée par un sac flexible de 150 m^3 placé à l'intérieur d'un réservoir ventilé en acier assurant une protection contre le vent et la neige. Ces sacs permettent un stockage peu coûteux du biogaz, mais ils sont volumineux et peuvent subir les effets des intempéries (vent, neige) s'ils ne sont pas protégés.

À LEL Farms Ltd.[8], le digesteur est recouvert d'une membrane flexible sans aucune protection contre les éléments. Par grand vent, si la couverture souple n'est pas entièrement gonflée, on insuffle de l'air pour l'empêcher d'onduler. On s'est rendu compte que l'addition d'oxygène (air) entraînait une perte de qualité du biogaz. L'addition d'une couverture à charpente rigide a été recommandée pour protéger une couverture souple et éliminer le besoin d'addition d'air et améliorer la qualité du biogaz. À Folkema Farm[15], le biogaz est aspiré dans un sac extérieur souple de 80 m^3 recouvert d'une structure à charpente en "A". La pression maximale du gaz est de 2,5 kPa. À la ferme laitière Foster Bros., le digesteur "tunnel" et une couverture formée d'une membrane souple ont été abrités par un bâtiment à charpente de bois afin de protéger le système contre le vent et la neige. Au CRIQ, on a installé des instruments destinés à surveiller le sac de gaz à l'intérieur du réservoir d'acier, en vue

bag within the steel tank, with the objective of identifying improved compression storage techniques(8).

Rigid biogas storage systems have also been used. The most common rigid storage structure in application is a steel tank, used at a pressure of 35 to 40 kPa. Propane tanks have been used for biogas storage at pressures up to 1400 kPa, although in practice, high pressure storage is expensive, complex and potentially dangerous(11). At Cattleland, 23 m^3 petroleum tanks were used to provide low pressure rigid storage and surge capacity. On the Mason-Dixon farm, consideration was being given to the use of a rigid cover to eliminate problems with the flexible cover.

The options for the direct use of biogas on the farm include:

i) direct burning for heating;

ii) fuel for a stationary internal combustion or diesel engine driving a generator to produce electricity; and

iii) fuel for mobile power units.

The use of biogas as a fuel for mobile power units may have popular appeal, but is not used in practice due to the high pressure storage requirements. Again, the technical complexity and equipment costs required for

d'améliorer les techniques de stockage par compression(8).

On a également utilisé des systèmes de stockage rigides du biogaz. Le plus communément utilisé est un réservoir d'acier, prévu pour une pression de 35 à 40 kPa. Des réservoirs de gaz propane ont également été utilisés pour le stockage du biogaz à des pressions atteignant jusqu'à 1400 kPa, bien qu'en pratique, le stockage sous haute pression soit coûteux, complexe et potentiellement dangereux(11). À Cattleland, des réservoirs de pétrole de 23 m^3 ont été utilisés pour le stockage à basse pression du biogaz et pour éviter les risques inhérents aux surpressions. À la ferme Mason-Dixon, on a envisagé d'utiliser une couverture rigide pour éliminer les problèmes causés par une couverture souple.

Parmi les options d'utilisation directe du biogaz dans les fermes, citons:

i) le brûlage direct pour fournir du chauffage;

ii) l'utilisation en tant que combustible pour moteur fixe à combustion interne ou pour moteur diesel actionnant une génératrice d'électricité;

iii) l'utilisation en tant que combustible pour des génératrices mobiles.

L'utilisation de biogaz comme combustible pour les génératrices mobiles présente beaucoup d'intérêt, mais cette technique n'est pas appliquée à cause des exigences de stockage sous pression élevée. Là encore, la complexité technique et les coûts

the high pressure storage of biogas are prohibitive.

It is widely accepted that biogas is more efficiently used as a heating fuel than as a producer of electrical energy[28]. Most farms have used biogas heat to maintain an optimal thermal environment in the anaerobic reactor, and to supply heat to farm buildings and facilities (farmhouse, workshops, farrowing/nursery units, milking parlour, etc.). For most on-farm applications, however, biogas production exceeds the farm's thermal energy demand, and it is not practical or economical to store biogas for a long period of time. Creative uses for biogas heat, therefore, are desired. In Canada, only a few alternate uses have been identified. At the CRIQ digester, greenhouses located near the digester provide an excellent opportunity for the use of digester biogas directly for heating. At Linden Lee Farms Ltd.[20], hot water from a storage tank can be used to dry grain using hot water radiators. Larger installations operating in the United States have found some unique uses for biogas as a boiler fuel. These uses include biogas as a boiler fuel for an alcohol still (Leefers farm)[25], a steam flaker (Fat City Feedlot), dehydrators (Cal Feed process) and a meat packing plant (Kaplan Feedlot). At

du matériel requis pour le stockage à haute pression du biogaz sont prohibitifs.

Il est communément admis que le biogaz est utilisé plus efficacement comme combustible de chauffage que pour la production d'énergie électrique[28]. Dans la plupart des fermes, on utilise la chaleur de combustion du biogaz pour maintenir un environnement optimal dans les digesteurs anaérobies, et pour chauffer les bâtiments et les installations de la ferme (maison, ateliers, bâtiments de mise bas et d'élevage des jeunes, enceinte de traite, etc.) Toutefois, pour la plupart des applications agricoles, la production de biogaz dépasse la demande en énergie thermique, et il n'est ni pratique ni économique de stocker le biogaz pendant de longues périodes. Il serait donc souhaitable de trouver des utilisations nouvelles pour la chaleur de combustion du biogaz. Au Canada, seulement quelques autres utilisations possibles ont été identifiées. Au CRIQ, les serres à proximité du digesteur constituent un excellent débouché pour l'utilisation directe du biogaz pour le chauffage. À Linden Lee Farms Ltd.[20], on peut utiliser des radiateurs à eau chaude alimentés par un réservoir de stockage pour sécher les céréales. Aux États-Unis, de grandes installations ont trouvé des applications particulières au biogaz et il est utilisé comme combustible de chaudières, par exemple pour un alambic à alcool (ferme Leefers)[25], une floconneuse à vapeur (Fat City Feedlot), des déshydrateurs (procédé Cal Feed) et une usine de conditionnement de la

the Lubbock Feedlot, methane will be used to fuel a biogas carbon dioxide separation process, with the carbon dioxide to be used in a crude oil recovery process(29).

Where biogas production exceeds thermal energy demand, farmers have turned to electrical generation in order to maximize the utility of the produced energy. While generation of electrical energy alone is considered inefficient, cogeneration has been practiced, with heat recovered from engine coolant and exhaust gas. Even with low pressure reserve storage, however, matching electrical production with time of day demand is difficult. Most farms have two peak demands of about two hours each, corresponding to milking/feeding times. An exception to this problem by virtue of scale is the Mason-Dixon farm in the U.S. where milking occurs twenty hours per day(30).

The sizing of cogeneration equipment is critical. At Linden Lee Farms Ltd., cogeneration equipment was downsized in an attempt to match the lower than expected gas production rate. On the Foster Bros. Farm, the generation equipment was upsized in order to maximize the revenue generated from the produced biogas. In practice, the engine size has ranged

viande (Kaplan Feedlot). À l'usine Lubbock Feedlot, on utilise le méthane comme combustible pour séparer le biogaz du dioxyde de carbone, ce dernier étant utilisé pour la récupération du pétrole brut(29).

Quand la production de biogaz dépasse la demande en énergie thermique, les fermiers se tournent vers la production d'électricité pour tirer le meilleur parti possible de l'énergie produite. Alors que la production d'énergie électrique seule est jugée inefficace, on a utilisé des techniques de récupération de chaleur, la chaleur étant récupérée du système de refroidissement du moteur et des gaz d'échappement. Toutefois, même avec un stockage à basse pression, il est difficile de régler la production d'électricité en fonction des périodes de pointe de la demande. Dans la plupart des fermes, il y a deux périodes de pointe d'environ deux heures chacune, qui correspondent aux périodes de traite et d'alimentation. On note une exception à ce problème: il s'agit de la ferme Manson-Dixon aux États-Unis, où les vaches sont traites à des intervalles de vingt heures(30).

Le choix des dimensions des équipements de récupération de chaleur est critique. À Linden Lee Farms Ltd., on a réduit la capacité du matériel de récupération de chaleur pour qu'il corresponde au taux de production de gaz qui est inférieur à celui prévu. À la ferme Foster Bros., on a augmenté la taille des génératrices afin de maximiser les revenus de la production de biogaz. En pratique, la puissance des moteurs était comprise entre 15

from 15 to 71 kW on Canadian installations, using induction generators from 7.5 to 60 kW in size. The alternate fuels on which the engines operate include natural gas and/or propane.

3.3.4 Effluent Utilization. Without further processing or treatment, the predominant use of digester effluent is landspreading as a source of nitrogen and organic matter. In some instances, the means of application is no different than the manure handling method usually practiced on the farm. In other instances, the separated liquid effluent is used in an irrigation system which increases the ease of manure handling.

One concern in using digester effluent for landspreading is the value of the effluent as a fertilizer. The digestion process does not change the concentration of the major nutrients such as nitrogen, phosphorus and potassium. Although the total Kjeldahl nitrogen (TKN) is conserved in the digestion process, some of the organic nitrogen is converted to the more volatile ammonia nitrogen. This may result in the loss of nitrogen if stored prior to land application, according to the results given by MacDonald et al.(13). Some farmers, however, feel the effluent is a better fertilizer

et 71 kW dans les installations canadiennes, et celles-ci utilisaient des génératrices à induction de 7,5 à 60 kW. Parmi les combustibles de remplacement utilisés avec ces moteurs, notons le gaz naturel et(ou) le propane.

3.3.4 Utilisation des effluents. - L'utilisation principale des effluents non traités d'un digesteur est l'épandage agricole, car ils constituent une source d'azote et de matières organiques. Dans certains cas, leur application est conforme à la méthode d'épandage du fumier normalement pratiquée dans les fermes. Dans d'autres cas, l'effluent liquide séparé est utilisé dans un système d'irrigation qui facilite la manutention du fumier.

Étant donné que l'effluent du digesteur est épandu, on se préoccupe de sa valeur comme fertilisant. Le processus de digestion ne modifie pas la concentration des principaux éléments nutritifs comme l'azote, le phosphore et le potassium. Bien que l'azote Kjeldahl total (AKT) reste intact au cours du processus de digestion, une certaine partie de l'azote organique est convertie en azote ammoniacal plus volatil. Cela peut entraîner des pertes d'azote si l'effluent est stocké avant d'être épandu, selon les résultats publiés par MacDonald et al.(13). Toutefois, certains fermiers pensent que l'effluent est un fertilisant de meilleure qualité parce qu'il comporte une fraction supérieure d'azote total sous la

because a higher portion of the total nitrogen is in the more readily available ammonia form[29].

Odour reduction has been noted as a significant factor in the land application of digester effluent. In some instances, one of the primary objectives of the anaerobic installation was to control odour. Odour control reduces the social pressures experienced by a farm when urban encroachment occurs on agricultural lands. In addition, at Linden Lee Farms Ltd., the less odorous effluent has permitted controlled top dressing of cereal crops in June, a more convenient management time. It has been stated that at this time, the use of anaerobic technology for odour control justifies continuing research and developmental work[8]. Field experience has consistently indicated that odour control can be considered a major benefit of an on-farm anaerobic installation.

In order to use the effluent from an anaerobic digester further, digested solids are separated from the liquids by centrifugation, screening and/or pressing. In some cases, mildly cationic polyelectrolytes or polymers have been added prior to centrifugation to increase the solids capture efficiency. The recovered solids have been inves-

forme ammoniacale plus facilement utilisable[29].

On a noté que l'atténuation des odeurs est un facteur important dans le cas de l'application agricole d'effluents de digesteur. Dans certains cas, l'un des principaux objectifs de l'installation de traitement anaérobie est la suppression des odeurs nauséabondes. Le contrôle des odeurs nauséabondes diminue les pressions sociales subies par les fermiers par suite du grignotage des terres agricoles dans les régions urbaines. De plus, à Linden Lee Farms Ltd., l'effluent à plus faible odeur a rendu possible l'épandage d'engrais de surface pour des cultures de céréales en juin, à une époque de l'année permettant un meilleur rendement. On a affirmé qu'à ce stade, l'application de la technologie anaérobie pour la réduction des odeurs nauséabondes justifie la poursuite des travaux de recherche et de développement[8]. Des expériences faites sur place ont permis de constater à plusieurs reprises que l'atténuation des odeurs nauséabondes constitue un important avantage des installations anaérobies dans les fermes.

Pour encore mieux utiliser les effluents d'un digesteur anaérobie, on sépare les matières solides du liquide par centrifugation, par tamisage et(ou) par pressage. Dans certains cas, on ajoute des polymères ou des polyélectrolytes légèrement cationiques avant la centrifugation pour augmenter l'efficacité de capture des matières solides. On a étudié l'utilisation possible des matières solides

tigated for use as either livestock bedding, or as a feedstuff supplementing traditional livestock feed ingredients.

The use of separated solids as a bedding material has been very limited primarily because of the high moisture content of digested solids. On the Mason-Dixon farm, the attempt was made to use the solids as the only source of bedding, completely eliminating the need for bedding grain crops[30]. However, due to the high moisture content (75%) of the solids, and the associated bacteria growth, this practice was discontinued. Based primarily on the U.S. experience, the general outlook for the use of separated solids as livestock bedding material is not encouraging.

The recovered separated solids have been referred to by various names in the literature. These include: single cell protein (SCP); methane fermentation residue (MFR); protein fermentation produced (PFP); and residue of anaerobic digestion (ROAD). For the purposes of generality, the ROAD designation will be used in this report to refer to the digester solids recovered for further use as a livestock feedstuff.

ROAD feeding trials have been primarily concerned with two aspects of the refeeding practice: the

récupérées pour servir de litière au bétail et de supplément alimentaire qu'on ajoute aux ingrédients courants des moulées du bétail.

L'utilisation des matières solides séparées comme litière est très limitée en raison de la forte teneur en eau des matières, après digestion. À la ferme Manson-Dixon, on a tenté d'utiliser les matières solides comme source unique de litière, de façon à éliminer complètement la nécessité de cultures pour litière[30]. Toutefois, la forte teneur en eau (75 p. 100) des matières solides et la croissance bactérienne qui lui est associée, ont forcé à abandonner cette pratique. En se basant principalement sur l'expérience des États-Unis, l'utilisation des matières solides séparées comme litière de bétail, dans son ensemble, n'est pas prometteuse.

Les matières solides récupérées portent divers noms dans la documentation. On les nomme protéines unicellulaires (PU), résidus de fermentation du méthane (RFM), produits de fermentation protéinés (PFP), ou résidus de digestion anaérobie (RDA). Dans le présent rapport, nous utilisons l'appellation RDA, qui est plus générale, pour désigner les matières solides récupérées pour servir d'aliments au bétail.

Les essais d'alimentation aux RDA portaient principalement sur deux aspects des pratiques de recyclage des aliments: la compo-

nutrient composition of ROAD, and the observation of livestock weight gain and feed efficiency effects. The most recent nutritional evaluation by Mowat et al.[31], showed the dry matter to have a mean crude protein content of 24.7% for beef cattle, and 37.5% for swine digester residues. Due to this higher crude protein content, the feed potential for swine digester residue may be greater than that of beef cattle residues. However, swine cannot use the non-protein nitrogen present in ROAD whereas ruminants can. This combination could limit the farming operations that could use ROAD as a feed, since there are relatively few large beef and hog operations which run on the same farm. In Canada at the present time, all ROAD must be used on the producing farm since there are no federal standards established to register ROAD as a feed for sale. A high ash content of 36.4% (dry basis) was reported for both beef cattle and swine ROAD [31]. In general, these results are representative of some earlier studies in which the nutrient composition of beef cattle ROAD was determined[32, 33].

In most feeding trials, cattle have shown depressed weight gain and feed efficiency when ROAD was used

sition nutritive des RDA et l'observation des gains de poids du bétail et de l'efficacité de l'alimentation. L'évaluation nutritionnelle la plus récente, effectuée par Mowat et al.[31], a montré que les matières sèches avaient une teneur moyenne en protéines brutes de 24,7 p. 100 dans le cas des résidus de digesteur de fumier de bovins, et de 37,5 p. 100 pour les résidus de digesteur de fumier de porcs. Leur teneur en protéines brutes étant élevée, le potentiel alimentaire des résidus de digesteur de fumier de porcs peut être supérieur à celui des résidus de digesteur du fumier de bovins. Toutefois, les porcs ne peuvent utiliser l'azote non protéiné présent dans les RDA, alors que les ruminants le peuvent. Cela pourrait limiter les utilisations des RDA en tant qu'aliments, étant donné que peu nombreuses sont les exploitations agricoles importantes qui pratiquent à la fois l'élevage des bovins et des porcs. Actuellement, au Canada, tous les RDA doivent être utilisés sur la ferme qui les produit parce qu'il n'existe aucune norme fédérale permettant l'homologation des RDA comme aliment pouvant être commercialisé. Une teneur en cendres élevée de 36,4 p. 100 (en poids sec) a été signalée pour les RDA des bovins et des porcs[31]. En général, ces résultats correspondent à ceux de certaines études antérieures qui ont permis de déterminer la composition des matières nutritives des RDA des bovins[32, 33].

Dans la plupart des essais d'alimentation du bétail, on a observé de faibles gains de poids et une moins bonne efficacité lorsque les

as a supplemental protein source. This reduced performance has been attributed to low energy availability and poor ash digestibility[34-36]. In one instance, using a sun-dried centrifuge cake with reduced moisture (40%), improved the reduction in livestock consumption from 17% to 7%[37]. In addition to lower rates of gain, steers fed ROAD have also shown increased feed requirements per unit gain. The practice of refeeding ROAD was recently discontinued on the Cattleland beef feedlot in Canada, following a series of studies on the refeeding practice[16, 38-41].

Some other issues concerning the practice of ROAD refeeding include: livestock palatability, the build-up of heavy metals, and public perception of the practice. In field experience, one of the major problems noted has been feed intake by the animals. Rejection becomes more apparent as the amount of ROAD substituted for normal protein supplements increases. On the Selves Farms Ltd. hog farm, palatability may prove to be a deciding factor in the continuation of the refeeding program. The build-up of heavy metals within a livestock population being fed ROAD has received little research attention, despite the possible effects on livestock products. One

RDA étaient introduits comme suppléments protéinés. Cette performance réduite a été attribuée à la faible disponibilité énergétique et à la faible digestibilité des cendres[34 à 36]. Dans un cas, l'utilisation d'un gâteau de centrifugation séché au soleil, à humidité réduite (40 p. 100), a permis de réduire la consommation du bétail de 17 p. 100 à 7 p. 100[37]. On a constaté, chez des bouvillons alimentés aux RDA, en plus de taux de gains de poids plus faibles, des exigences accrues d'alimentation par unité de gain. La pratique du recyclage des RDA a été abandonnée récemment dans le parc d'engraissage de bovins de Cattleland au Canada à la suite d'une série d'études sur les pratiques de recyclage des aliments[16, 38 à 41].

Plusieurs autres questions relatives aux pratiques de recyclage des RDA portent sur la succulence du bétail, l'accumulation de métaux lourds et l'opinion qu'a le public de cette pratique. Au cours d'expériences faites sur place, l'un des principaux problèmes notés a été l'ingestion d'aliments par les animaux. Les cas de rejet devenaient de plus en plus notables à mesure que la quantité de RDA utilisée comme supplément protéique augmentait. À Selves Farms Ltd., une ferme d'élevage de porcs, la succulence pourrait être un facteur décisif pour la continuation du programme de recyclage. L'accumulation de métaux lourds dans une population animale nourrie de RDA a fait l'objet de très peu d'études, en dépit des conséquences possibles pour les produits de l'élevage du bétail. Une

study states that concentrations of selected potentially toxic elements in kidney, liver and muscle tissue were not affected by feeding ROAD[33]. However, this concern would have to be more fully addressed before any ROAD feeding program could be adopted as a common practice. Primary food processors (milk, meat) and the general public must be assured that food quality will in no way be adversely affected by refeeding ROAD practices.

3.4 Economic Implications

3.4.1 Capital Expenditures. Most of the agricultural anaerobic installations have been capital intensive due to the high costs associated with cogeneration equipment and/or the protein recovery facilities of the system. Full-scale systems in North America have typically ranged from about $100 000 to $300 000, although some distinct exceptions do exist. For example, the estimated total capital cost of a system designed to handle the waste from 10 000 cattle in Bartow, Florida[42] was $1 250 000 (U.S.) in 1980. The total system cost for the largest scale digester constructed in Canada (Cattleland) was $477 000. In contrast, the smaller scale 107 m^3 reactor on the Fallis

étude affirme que les concentrations de certains éléments potentiellement toxiques dans les tissus des reins, du foie et des muscles n'étaient pas modifiées par une alimentation contenant des RDA[33]. Toutefois, ce problème doit être étudié plus à fond avant qu'un programme d'alimentation comportant des RDA puisse être appliqué de manière courante. On doit pouvoir garantir aux producteurs primaires de lait et de viande ainsi qu'au public en général que la qualité des aliments ne sera pas affectée par les pratiques de recyclage des RDA.

3.4 Répercussions économiques

3.4.1 Immobilisations. - La plupart des installations agricoles anaérobies ont nécessité un investissement de fonds important en raison des coûts élevés entraînés par le matériel de récupération de chaleur et(ou) les installations de récupération de protéines du système. En Amérique du Nord, les systèmes à grande échelle ont coûté généralement de 100 000 $ à 300 000 $ environ, même s'il existe certaines exceptions précises. Par exemple, on a estimé à 1 250 000 $ (U.S.) le coût en capital d'un système conçu pour traiter les déchets de 10 000 bovins à Bartow (Floride) en 1980[42]. Le coût total du plus gros digesteur construit au Canada (Cattleland) a été estimé à 477 000 $. En revanche, le réacteur d'une capacité de 107 m^3 de l'exploitation agricole Fallis, fonctionnant à plus petite échelle et basé sur le modèle expérimental de l'État de

farm, which was based on the experimental Penn State design[43], was constructed at a total expenditure of $16 365[24].

Researchers, designers and users generally agree that small scaled-down units are neither practical nor economically possible using present designs. As an example, most of the equipment which was purchased for the biogas safety and biogas utilization system at Linden Lee Farms Ltd.[20] represented the smallest commercially available components for continuous use. The major components of the system, however, are capable of processing manure from a 3500 head finishing operation, making the components larger than necessary for the 1400 hog finishing operation.

One estimate by Energy Cycle, Inc.[29] suggests favourable returns from livestock operations having at least 300 milking cows, 600 sows (farrow to finish), 5000 finishing hogs, 100 000 laying hens or 1000 head beef cattle. Nemetz[28] projected, in investment dollar terms, the opportunity for various animal production units by type and size. The availability of volatile solids per animal and the digestibility used in this model, however, were not consistent with values reported in the field. In general, Winfield and Assoc.[8] warn that

Pennsylvanie[43], a été construit au coût total de 16 365 $[24].

Les chercheurs, les concepteurs et les utilisateurs admettent généralement que les petites unités ne sont ni pratiques ni rentables pour les installations actuelles. Par exemple, la plus grande partie du matériel acheté pour le système d'utilisation sécuritaire du biogaz chez Linden Lee Farm Ltd.[20] comportait le plus petit équipement disponible sur le marché pour une utilisation en continu. Cependant, les principaux éléments du système peuvent traiter le fumier provenant de l'étape de finition de 3500 têtes de bétail et sont donc plus grands que nécessaire pour traiter les excrétions provenant de la finition de 1400 porcs.

L'estimation d'Énergy Cycle[29] montre qu'il est possible de tirer des revenus avantageux de l'exploitation d'un cheptel constitué d'au moins 300 vaches laitières, 600 truies (exploitation d'élevage-engraissage), 5000 porcs de finition, 100 000 poules pondeuses ou 1000 têtes de bovins. Nemetz[28] a effectué des prévisions financières pour diverses unités de production animale, selon leur modèle et leur dimension. Cependant, la disponibilité des matières solides volatiles par animal, ainsi que la capacité de digestion de ce modèle ne concordaient pas avec les valeurs relevées en conditions réelles. En général, d'après les recommandations de

an anaerobic installation should not be costed on a per animal basis, since the specific cost is not proportional. The specific cost of the system is not necessarily proportional to the size of the anaerobic reactor either. For example, the three 570 m^3 reactor systems constructed by Biogas Laboratories on the Leefers, Smith and Naser farms cost $150 000, $203 000, and $275 000, respectively[29].

Typical cost breakdowns for the major components of a digestion system have been reported in the literature. According to Chandler et al.[44], the breakdown is reported to be: waste preparation and storage, 16%; digester, 42%; engine-generator, 30%; and miscellaneous, 12%. Estimates by Pohland and Harper[6] alter the distribution of costs slightly, with 25 to 35% for the digester itself, 10 to 20% for site preparation, and 50 to 70% gas clean-up and engine-generator set. In practice, these percentages are variable, depending upon such factors as the existing manure collection capabilities, the type and design parameters at the digester system, and other site variables.

Annual operating and maintenance costs (O&M) are incurred through the labour and material/equip-

Windfield et Assoc.[8], on ne doit pas prévoir le coût d'une installation anaérobie en multipliant un montant par le nombre d'animaux car son coût n'est pas proportionnel. Le coût du système n'est pas non plus nécessairement proportionnel aux dimensions du digesteur anaérobie. Par exemple, les trois digesteurs, d'une capacité de 570 m^3, construits par Biogas Laboratories dans les exploitations agricoles Leefers, Smith et Naser ont coûté respectivement 150 000 $, 203 000 $ et 275 000 $[29].

Certaines études ont signalé des ventilations caractéristiques des coûts relatifs aux principaux constituants d'un système de digestion. Selon Chandler et al.[44], la ventilation est la suivante: préparation et stockage des déchets, 16 p. 100; digesteur, 42 p. 100; moteur-génératrice, 30 p. 100; et divers, 12 p. 100. Les estimations de Pohland et Harper[6] modifient légèrement la répartition des coûts, soit de 25 à 35 p. 100 pour le digesteur lui-même, de 10 à 20 p. 100 pour la préparation du site et de 50 à 70 p. 100 pour l'épuration du gaz et l'ensemble moteur-génératrice. En pratique, ces pourcentages peuvent varier en vertu de facteurs tels que la capacité existante de ramassage du fumier, le modèle et la conception du digesteur, et autres variables inhérentes au site.

Des dépenses d'exploitation et d'entretien sont occasionnées par les besoins en main-d'oeuvre et en matériel/équipement d'une

ment needs of an on-farm anaerobic installation. However, there is only limited information published concerning O&M costs, since longer term monitoring and evaluation is required to obtain these costs accurately from the established full-scale systems. At the present time, estimates indicate that the annual O&M costs will be less than 10% of the initial capital expenditure.

3.4.2 Energy Displacement. The use of biogas for heating or cogeneration of heat and electricity has a direct impact on the economics of an anaerobic system. The value of the displaced energy contributes to the economic return associated with an anaerobic installation.

It is important that the farm attempt to use as much of the generated electricity as possible, and minimize the amount sold back to a local utility through grid interconnection. The price received from the sale of electricity can vary considerably from area to area. In most cases, however, the utility pays only a fraction of the rate charged for the use of electricity.

In Canada, the Selves farm has been successful in supplying all of the electrical power requirements on site (feed preparation, workshop, two residences) due to judicious load manage-

installation anaérobie fonctionnant dans une ferme. Cependant, les données publiées relatives aux frais d'exploitation et d'entretien sont limitées, et il faut prolonger le contrôle et l'évaluation si l'on veut connaître précisément les coûts des systèmes construits à grande échelle. Actuellement, les estimations indiquent que les coûts annuels d'exploitation et d'entretien sont inférieurs à 10 p. 100 des dépenses initiales en capital.

3.4.2 Changement de sources d'énergie - L'utilisation de biogaz pour le chauffage, ou la récupération de chaleur et la production d'électricité ont des répercussions directes sur l'économie d'un système anaérobie. La valeur de l'énergie de remplacement s'ajoute aux bénéfices économiques résultant d'une installation anaérobie.

Il est important que dans les exploitations agricoles on essaie d'utiliser au maximum l'électricité produite et qu'on minimise la quantité revendue à un service local en se raccordant au réseau d'électricité. Le prix de vente d'électricité peut varier considérablement d'une région à l'autre. Cependant, dans la plupart des cas, les services publics la paient à un prix très inférieur au tarif de la consommation d'électricité.

Au Canada, la ferme Selves a réussi à subvenir elle-même à tous ses besoins en électricité (préparation des moulées, atelier, deux maisons) grâce à une gestion judicieuse de la charge. Avec 480 m^3 de biogaz, le système de

ment. The cogeneration system was producing 850 kWh/d from 480 m^3 of biogas, resulting in an electrical energy saving of $4 000/yr when calculated as displaced energy purchases valued at $0.041/kWh. The decision not to interconnect to the Ontario Hydro grid was based on the low buy-back rate of $0.017/kWh at the time of construction(8).

In contrast, grid connection was used on the Linden Lee farm since the cogeneration system was only able to supply 43% of the 235 kWh/d consumed on the farm. An import-export control system regulated flow according to farm demands and production.

In addition to the ability of the farm to minimize the sale of electricity, the costs of purchasing electricity and the farm's electrical demand can affect the expected economic return from an anaerobic installation. For example, the electrical energy costs to the consumer in P.E.I. are the highest in Canada. When costs exceed $0.10/kWh and the buy-back rate exceeds $0.05/kWh; therefore, the cogeneration potential on the Linden Lee farm is more economically attractive than for other Canadian locations which have much lower rates(8).

récupération de chaleur produisait 850 kWh/d, ce qui s'est traduit par une économie d'énergie électrique de 4000 $/an calculée en achats d'énergie de remplacement estimés à 0,041 $ le kWh. Sa décision de ne pas se raccorder au réseau d'Hydro-Ontario tient au faible tarif d'achat, soit 0,0017 $ le kWh, en vigueur au moment de la construction(8).

En revanche, l'exploitation agricole Linden Lee a décidé de se raccorder au réseau électrique parce que son système de récupération de chaleur ne pouvait fournir que 43 p. 100 des 235 kWh/d utilisés. Un système de contrôle des importations-exportations a permis de régulariser le débit selon la demande et la production de l'exploitation agricole.

Outre la possibilité de réduire au minimum la vente d'électricité, le prix de l'électricité et la demande en énergie électrique des exploitations agricoles peuvent influer sur les profits prévus d'une installation anaérobie. Par exemple, c'est à l'Île-du-Prince-Édouard que l'énergie électrique coûte le plus cher au consommateur canadien. Lorsque le coût est supérieur à 0,10 $ le kWh et que le tarif de rachat est supérieur à 0,05 $ le kWh, le potentiel de récupération de chaleur à l'exploitation agricole Linden Lee est plus intéressant sur le plan économique que pour d'autres régions du Canada où les tarifs sont bien inférieurs(8).

The demand-based rate structure of most electrical utilities means that electrical production is not always reflected as a reduction of the monthly electrical bill. For example, on the Gasser farm, a potential farm self-sufficiency of 83% was predicted when only kWh were considered. In practice, the yearly power bill will only be reduced by about 50%. If cogeneration equipment is out of service for even 20 minutes during a peak demand time, a significant monthly demand is applicable under Hydro-Québec's demand rate structure[8].

Cogeneration has been used successfully with a fixed-film digester on the Folkema farm. While no long-term electricity production figures are available, the production of 70 to 80 kWh/d had been achieved with the 15 kW generator operating six to seven hours per day.

In summary, there are primarily four factors affecting the economics of energy displacement on the farm through the production of electricity:

i) the high costs of engine generator sets (as much as 50% of the total system expenditure), and the high cost of equipment to interconnect safely with the local utility (from $10 000 to $30 000);

ii) peak demands on the farm for electricity, which are not synchronous with the continuous production of biogas;

Un tarif basé sur la demande de la plupart des installations électriques signifie que la production d'électricité ne se traduit pas toujours par une diminution de la facture mensuelle d'électricité. Par exemple, on avait prévu à l'exploitation agricole Gasser une autonomie de 83 p. 100 en ne considérant que le kWh. En pratique, la facture d'électricité n'a baissé que de 50 p. 100. Si le système de récupération de chaleur ne fonctionne pas pendant seulement 20 minutes au cours d'une période de forte demande, les tarifs d'Hydro-Québec basés sur la demande prévoient une demande mensuelle importante[8].

La récupération de chaleur a donné des résultats satisfaisants à l'exploitation agricole Folkema qui est équipée d'un digesteur à lit bactérien. Même si l'on ne dispose d'aucun chiffre sur la production d'électricité à long terme, l'exploitation pouvait produire de 70 à 80 kWh/d lorsque la génératrice de 15 kW fonctionnait de 6 à 7 h par jour.

En résumé, quatre facteurs principaux influent sur l'économie que constitue, pour une exploitation agricole, la production d'électricité de remplacement:

i) les coûts élevés de l'ensemble moteur-génératrice (50 p. 100 des coûts totaux du système) et du matériel de raccordement au réseau local d'électricité (de 10 000 $ à 30 000 $);

ii) les demandes maximales d'électricité à la ferme qui ne coincident pas avec la production continue du biogaz;

iii) low on-site electrical requirements; and

iv) the lack of buy-back arrangements (Hydro-Québec), or low buy-back rates by the local utility (Ontario Hydro).

3.4.3 Effluent Value. Due to the factors discouraging the sale of ROAD, the only farm installation in North America marketing a centrifuged digester effluent solids product (1983) was the Cal Feed plant in Guymon, Oklahoma, selling Cal Feed Protein Meal at $63/Mg total solids[29]. However, in an economic evaluation of a ROAD refeeding practice, it is typical to estimate the generated revenue as the value of the normal protein supplements displaced by ROAD, with a discount compensation for the increased feed consumption of the livestock. Based on these estimates, the revenue generated by ROAD refeeding has been projected to contribute more than 80% to the total annual revenues where both cogeneration and protein recovery is practiced, ranging from $30 000 up to $500 000 annually. In the U.S. experience, the value of the digester effluent as a livestock feedstuff has reportedly ranged from $20 to $112/Mg total solids[29].

iii) les faibles besoins internes en électricité;

iv) l'absence de régime d'achat (Hydro-Québec) ou les faibles tarifs d'achat appliqués par le service local (Hydro-Ontario).

3.4.3 Valeur des effluents. - En raison des facteurs en défaveur de la vente de résidus de digestion anaérobie (RDA), la Cal Feed de Guymon (Oklahoma) a été la seule installation agricole en Amérique du Nord à commercialiser un produit fabriqué à partir de matières solides d'un effluent centrifugé de digesteur (1983). Ce produit, le "Cal Feed Protein Meal", est vendu au prix de 63 $ la tonne* de matières solides totales[29]. Cependant, lors d'une évaluation économique d'une méthode de recyclage des RDA dans l'alimentation, il est courant d'estimer les revenus obtenus en fonction de la valeur des suppléments protéiques normaux remplacés par les RDA, en tenant compte de l'accroissement de consommation de nourriture du bétail. D'après ces estimations, on a prévu que le revenu tiré du recyclage des RDA constituait plus de 80 p. 100 des recettes annuelles totales d'une installation pratiquant à la fois la récupération de chaleur et la récupération de protéines, soit de 30 000 $ à 500 000 $ annuellement. Selon un rapport sur une expérience effectuée aux États-Unis, la valeur de l'effluent d'un digesteur, calculée en nourriture pour le bétail, allait de 20 $ à 112 $ la tonne de matières solides totales[29].

---

* 1 tonne = 10^3 kg = 10^6 g.

Initially, the refeeding of separated digester effluent as a protein supplement had been projected as a very significant source of input cost reduction for on-farm anaerobic installations. However, based on the negative aspects observed when using ROAD in feed trials (depressed weight gains, palatibility problems, etc.), it is unlikely that such optimistic projections will be realized. As just one example, the feed cost reductions at Selves Farms Ltd. have not been consistent with the predictions put forward by MacDonald et al.(45).

Initialement, on avait prévu que le recyclage de l'effluent d'un digesteur distinct, sous forme de supplément protéique, permettrait en grande partie de diminuer les coûts inhérents aux installations anaérobies dans la pratique. Cependant, si l'on se base sur les aspects négatifs relevés lors de l'utilisation des RDA dans l'alimentation (gain de poids réduit, problème d'acceptabilité du goût, etc.), il est peu probable que de telles prévisions optimistes se réalisent. Par exemple, la diminution du coût des aliments notée à l'exploitation agricole Selves Farms Ltd. ne concordait pas avec les prévisions formulées par MacDonald et al.(45).

References

1. Lapp, H.M., D.D. Schulte, and L.C. Buchanan, "Methane Gas Production From Animal Wastes", Agriculture Canada, Pub. no. 1528 (1974).

2. Stafford, D.A., D.L. Hawkes, and R. H rton, Methane Production from Waste Organic Matter, CRC Press Inc., Florida (1980).

3. Timbers, G.E. and R.P. Hocking, "Agriculture Canada's Biomass Energy Program", Energy from Biomass, Canadian R&D Program National Conf. (1979).

4. Ponkhurst, E.S., "Gas Engineering and Management" (Jan., 1980).

5. Hall, E.R., "The Development and Utilization of Anaerobic Technology in Canada", presented at 3rd Int. Symp. on Anaerobic Digestion, Boston, MA (Aug., 1983).

6. Pohland F. G. and S. R. Harper, "Biogas Developments in North America", Proc. of the 4th Int. Symposium on Anaerobic Digestion (Nov., 1985).

7. Loehr, R.C., Agricultural Waste Management, Academic Press Inc., London and New York (1974).

8. Winfield & Assoc., Biogas Production Facilities on Farms, DSS 34SZ 01916-5-ER53 (Jan., 1986).

9. Hobson, P.N., ADAS Seminar Report, Anaerobic Digestion of Farm Wastes, p. 13, MAFF, Coley Park, Reading (1978).

10. Canviro Consultants Ltd., Final Report on the Demonstration of Energy Production and Conservation by Anaerobic Digestion and Protein Recovery at a Commercial Hog Farm, Ontario Ministry of Agriculture and Food (March, 1984).

11. Lapp, H.M., "Feasibility of Using Methane Produced from Animal Wastes for Energy", Energy from Biomass, Canadian R&D Program, National Conf. (1979)

12. Canviro Consultants Ltd., Final Report on the Demonstration of Anaerobic Digestion and Single Cell Protein Recovery at a Canadian Beef Feedlot, submitted to DRECT Program of Waste Management Branch, Environment Impact Control Directorate, Environmental Protection Service, Department of Environment (1982).

13. MacDonald, R.D., D. Marshall, and J. Barclay, "The Kemptville College Downflow Stationary Fixed-Film Anaerobic Digester", CSAE paper no. 84-412 (1984).

14. Cournoyer, M.S., U. Delisle et al., A Mixed Plug-flow Anaerobic Digester for Dairy Manure, ASAE Paper no. 84-4562 presented at New Orleans, LA (1984).

15. Maat, D.Z., Design, Construction and Operation of a Full Scale Downflow Fixed-Film Reactor Using Hogwaste Substrate, Fifth Canadian Bioenergy R&D Seminar (1984).

16. Varel, V.H., H.R. Isaacson, and M.P. Bryant, "Thermophilic Methane Production from Cattle Waste", Applied and Environmental Microbiology, 33, No. 2 (Feb., 1977).

17. Harvey, M. "Anaerobic Fermentation Via Fixed Film Media: Cloisonlye" (unpublished report).

18. Kennedy, K.J. and L. Van den Bery, "Anaerobic Digestion of Piggery Waste Using a Stationary Fixed Film Reactor", Agricultural Wastes, 151-158 (1982).

19. MacDonald, R., D. Marshall, and R. Chagnon, "Comparative Evaluation of Five Full Scale Anaerobic Digestors", CSAE Paper 83-411 (July, 1983).

20. Canviro Ltd., Final Report on the Demonstration of Energy Production and Conservation by Anaerobic Digestion and Electrical Co-generation of Swine Manure, EMR demonstration project in PEI, Canviro Consultants Ltd. (1985).

21. Canviro Ltd., Final Report of the Demonstration of Energy Production and Conservation by Anaerobic Digestion and Electrical Co-generation of Swine Manure, prepared for Agricultural Energy Centre, OMAF (1984).

22. Pos, J. et al., Renewable Energy Biomass Digestion, Progress Report, School of Engineering, Univ. of Guelph, Guelph, Ont. (1985).

23. McKinney, R.E., "Anaerobic Treatment Concepts", TAPPI Environmental Conf. (1984).

24. Hocking, R.P., G.E. Timbers, and J. Fallis, "A Farm Scale Anaerobic Digester, Phase I, Construction, Start up and Operation", Report 1-673, Agriculture Canada, Engineering and Statistical Research Institute (Nov., 1984).

25. Schellenback, S., "Case Study of a Farmer Owned and Operated 1000 Head Feedlot Anaerobic Digester", Energy from Biomass and Wastes VI Symposium Papers (1982).

26. Parsons, R.A., On-farm biogas production, Pub. no. NRAES-20 of the Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Riley Robb Hall, Cornell Univ., Ithaca, NY, 14853 (1984).

27. Cournoyer, M.S., Urgel Delisle et Associés, "Évaluation d'un digester anaerobie", Fifth Canadian Bioenergy R&D Seminar (1984).

28. Nemetz, I., An Economic Analysis of the Potential of Anaerobic Digestion for Energy Production and Protein Recovery in Canada, Inputs & Technology Analysis Div., Development Policy Directorate, Agriculture Canada, Ottawa (1984).

29. Hashimoto, A.G., "Commercialization of Anaerobic Digestion Technology in the United States of America", 3rd Int. Symposium on Anaerobic Digestion, Boston, MA (1983).

30. Bentz, L.B., "Manure's Biogas Powers Dairy Farm", Soil and Water Conservation News (Sept. 1980).

31. Mowat, D.N., G.K. MacLeod, and J.G. Buchanan-Smith, Nutritional Evaluation of Residue from Methane Fermentation of Animal Wastes, Final report, strategic grant no. G0978, Dept. of Animal and Poultry Sc., University of Guelph (1985).

32. Kinderman, E.M., A.Y. Yam, and S.M Kohan, Technical and Economic luations of Biomass Utilization Processes: Technical Report no. 1, SRI International, Menlo Park, CA (1980).

33. Harris, J.-M., "Nutrient Availability in Diets Fed to Steers that Contained (1) Whole Blood from Cattle Mixed with Various Levels of Sodium Chloride as an Anticoagulant and (2) Methane Fermentation Residue", DAI, 42 (09) (1981).

34. Hashimoto, A.G., Y.R. Chen, and R.L. Prior, "Methane and Protein Production from Animal Feedlot Wastes", Journal of Soil and Water Conservation, 34, No. 1 (Jan-Feb, 1979).

35. Prior, R.L., R.A. Britton, and A.G. Hashimoto, "Nutritional Value of Anaerobically Fermented Beef Cattle Wastes in Diets for Beef Cattle and Sheep", 4th International Symposium on Livestock Wastes (1980).

36. Harris, J.M. and R.L. Shirley, "Nutrient Availability and Feedlot Performance of Steers Fed Rations Containing Methane Fermentation Residue", Florida Beef Cattle Research Report 1981 (1981).

37. Burford, J., "Biogas From Feedlot Manure", Mid-American Biomass Energy Workshop (May, 1979).

38. Canviro Consultants Ltd., Thermophilic Anaerobic Fermentation of Beef Cattle Manure for Protein and Methane Production, Final Report on 1979/80 Laboratory Studies, Report submitted to National Research Council of Canada (1980).

39. Canviro Consultants Ltd., Thermophilic Anaerobic Fermentation of Beef Cattle Manure for Protein and Methane Production, Final Report on 1980/81 Laboratory Studies, submitted to National Research Council of Canada, Contract Serial No. OSZ80-00020 (1981).

40. Canviro Consultants Ltd., Thermophilic Anaerobic Fermentation of Swine and Beef Manure for Methane and Protein Recovery, Final Report on 1981/82 Laboratory Studies submitted to National Research Council of Canada, Contract Serial No. OSX80-00131 (1982).

41. Canviro Consultants Ltd., First Progress Report on Evaluation and Optimization of Protein Recovery from Anaerobically Digested Beef Cattle Feedlot Waste, Report submitted to Agriculture Canada (1982).

42. Lzdas, Daniel J., Warren B. Coe, Experimental Anaerobic Fermentation Facility, U.S. Department of Energy, EG-77-C-01-4015 (1980).

43. Persson, S.P.E. et al., "Agricultural anaerobic digesters - design and operation", Bulletin 827, Penn. State Univ. (1979).

44. Chandler, J.A., S.J. Hermes, and K.D. Smith, "Comparative Analysis of Methane Fermentation Systems", Proceedings International Gas Research Conference, Los Angeles, CA (1981).

45. MacDonald, R.D., M. Selves, and R. Stickney, "Selves Farms Ltd. Anaerobic Digester for Cogeneration and Protein Recovery", CSAE paper no. 84-414 (1984).

Bibliography

A) Experimental/Lab Scale Research Studies

1. Brumm, T.J. and J.C. Nye, "Dilute Swine Waste Treatment in an Anaerobic Filter", Proc. of the 36th Ind. Waste Conf. (1982).

2. Chen, T.H. et al., "Kinetic Parameters of Thermophilic Digestion of Swine Manure", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 27(5) (1984).

3. Fischer, J.R., L. Iannotti, and C.D. Falhage, "Production of Methane Gas from Combinations of Wheat Straw and Swine Manure", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 26(2) (1983).

4. Hasheider, R.J. and D.M. Sievers, "Limestone Bed Anaerobic Filter for Swine Manure - Laboratory Study", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 27(3) (1984).

5. Hashimoto, A.G., Y.R. Chen, and V.H. Varel, "Anaerobic Fermentation of Beef Cattle Manure", prepared for the Solar Energy Research Institute (1981).

6. Hashimoto, A.G., "Conversion of Straw-Manure Mixtures to Methane of Mesophilic and Thermophilic", Biotech. and Bioeng., 25,2 (1983).

7. Hills, D.J., "Intermittently Mixed and Plug Flow Digestion of Beef Feedlot Manure at Various Water Contents", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 26(3) (1983).

8. Hills, D.J. and J.J. Mehlschau, "Plug Flow Digestion of Dairy Manure of Different Solids Concentrations", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 27(3) (1984).

9. Huang, J.J.H. and J.C.H. Shih, "The Potential of Biological Methane Generation from Chicken Manure", Biotech. and Bioeng., 23 (1981)

10. Liao, P.H. and K.V. Lo, "Methane Production Using Whole and Screened Dairy Manure in Conventional and Fixed Film Reactors", Biotech. and Bioeng., 27 (1985).

11. Lo, K.V., P.H. Liao, and N.R. Bulley, "An Integrated Dairy Manure Treatment and Biogas Production System", 5th Canadian Bioenergy R&D Seminar (1984).

12. Ripley, L.E., W.C. Boyle, and J.C. Converse, "Improved Allcalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of Poultry Manure", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

13. Ripley, L.E., N.M. Kmet, W.C. Boyle, and J.C. Converse, "The Effects of Ammonia Nitrogen on the Anaerobic Digestion of Poultry Manure", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

14. Yang, P.Y. and C.Y. Chou, "Horizontal Baffled Anaerobic Reactor for Treating Diluted Swine Wastewater", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

14. Yang, P.Y. and Y.T. Wong, "Sludge Recycling for Methane Fermentation Processing of Swine Wastewater", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf. (1983).

15. Yang, P.Y. and S.Y. Nagano, "Integrating Anaerobic Digestion and Algal-Biomass Treatment Processes for Swine Wastewater", Proc. of the 38th Ind. Waste Conf. (1984).

B) Pilot/Full-scale Reports

1. Ben-Hassan, R.M., A.E. Ghaly, and R.K. Singh, "Design and Evaluation of N-Mix Energy Efficient Anaerobic Digester", CSAE paper 85-408 (1985).

2. Chandler, J.A., S.J. Hermes, and K.D. Smith, "A Low Cost 75 KW Covered Lagoon Biogas System", Symposium Papers, Energy from Biomass and Wastes (1983).

3. Chen, J.S., B. Frey, and H.L. Brodie, "Scum Accumulation in Plug-Flow Digesters -A Problem with Flushed Dairy Manure", ASAE Trans., 27-28 (1984).

4. Coppinger, E., J. Brautigum, J. Lenart, and D. Baylon, Report of the Design and Operation of a Full-Scale Anaerobic Dairy Manure Digester, U.S. Department of Commerce, NTIS (1979).

5. Coppinger, E. and M.F. Richter, "Operational Experience from the Kaplan Industries Anaerobic Digester", Fuel Gas Developments, D.L. Wise (ed.) CRC Press, Florida (1983).

6. Easterly, J.L. and E.C. Saris, Electric Power from Biofuels: Planned and Existing Projects in the U.S., Final Report, Contract No. DE-AC01-83CE-30784, U.S. Department of Energy (1984).

7. Eisenberg, D., Recovery of Methane from an Anaerobic Lagoon Treating Livestock Waste, Final Report, Grant No. DE-F003-80R-90035, U.S. Department of Energy (1980).

8. Fulton, E.L., Single Stage Anaerobic Digester at Tarleton State University, Final Report, Tarleton, State University, Stephenville, TX (1980).

9. Hills, D.J. and M. Kayhanion, "Methane Gas Facilities for Flush-out Dairy Farm Systems", ASAE Paper 84-4559 (1984).

10. Jewell, W.J., "Low Cost Approach to Methane Generation, Storage, and Utilization from Crop and Animal Residues", Fuel Gas Production from Animal and Agricultural Residues and Biomass (1982).

11. Kinderman, E.M., A.Y. Yam, and S.M. Kohan, Technical and Economic Evaluations of Biomass Utilization Processes: Technical Report No. 1, SRI International (1980).

12. Knight, D.K., M.D. Clemont, and D.P. Ball, "Comparative Analysis of the Utilization of Biogas from a 275,000 Gallon Anaerobic Digester on a Poultry Farm", Symposium Papers, Energy from Biomass and Wastes (1985).

13. Lizdas, D.J., "Methane Production from Beef Cattle Feedlots", 2nd Annual Fuels from Biomass Symposium (1978).

14. Martin, J.H. and P.L. Lichtenberger, "Operation of a Commercial Farm-Scale Plug Flow Manure Digester", Symposium Papers, Energy from Biomass and Wastes (1981).

15. Meyer, R.W. and W.R. Guthrie, "Design and Operation of a 2.7 Million Gallon, Plug-Flow Digestion System for Cattle Manure", Symposium Papers, Energy from Biomass and Wastes (1985).

16. Persson, S.P.E. and D.J. Meyer, "Preliminary Report on Energy Integrated Swine Unit with Digester Odor Control and Solar Assisted Heating", NAR-ASAE Paper No. 83-305 (1983).

17. Pos, J., R.H. Boekhorst, B. Walezak, and V. Pavlicik, "The Design and Operation of a 1400 L Anaerobic Digester Utilizing Swine Manure", in: Proceedings of the Second International Symposium on Waste Treatment and Utilization, Theory and Practise of Waste Management, University of Waterloo, Waterloo, Ontario (June 18-20, 1980).

18. Pos, J., R. Porringa, and D. Eaton, "Construction and Start-up of a $45m^3$ Underground Farmscale Anaerobic Digester", NAR-ASAE Paper no. 82-103 (1982).

19. Quok, L., J. Chandler, and S. Schellenback, "Potential of Biogas Systems for California Farms with Confined Animals", Symposium Papers, Energy from Biomass and Wastes (1984).

20. Ross, C.C. and J.L. Walsh, "Energy Integrated Dairy Farm Digester and Cogeneration System Installation", Symposium Papers, Annual Meeting, American Society of Agricultural Engineers (1984).

21. Seekings, B., P. Rowland, and S. Rowland, The Construction and Operation of a Farm Methane Digester, Institute of Community Service, Freeport, ME, (1984).

22. Shih, J.C.H., Poultry Waste Digester: Final Progress Report, North Carolina State University Research Farm, Raleigh, NC (1983).

23. United Technologies Corp., Monfort Dirt Lot Experiments, Status Report, Department of Energy (1978).

24. United Technologies Corp., Design, Construction and Operation of a Full Scale Experimental Anaerobic Fermentation Facility, Department of Energy, Washington, D.C. (1981).

25. U.S. EPA, Anaerobic Digestion Facility Environmental Assessment, Bonneville Power Admin., Portland, OR (1984).

C) State of Development/Reviews

1. Abeles, T.P., "Anaerobic Digestion - An Overview", Mid-American Biomass Energy Workshop (1979).

2. Alich, J.A., F.A. Schooley, and R.K. Ernest, "Evaluation of the Use of Agricultural Residues as an Energy Feedstock: A Ten-Site Survey", Vol. I and Vol. II, Summary and General Information (1977).

3. Biomass Energy Institute Inc., "Anaerobic Digestion", Biogas Production from Animal Manure, Winnipeg, Manitoba (1978).

4. Cowley, I.D. and D.A.J. Wase, "Anaerobic Digestion of Farm Wastes: A Review Part 1 and Part 2", Process Biochemistry (1981).

5. Fannin, K.F., J.R. Conrad, V.J. Srivastava, D.E. Jerger, and D.P. Chynoweth, "Anaerobic Processes", Journal WPCF, 54, No. 6 (1986).

6. Hashimoto, A.G., Y.R. Chen, V.H. Varel, and S.A. Robinson, Anaerobic Fermentation of Beef Cattle Manure and Crop Residues, Annual Report, Solar Energy Research Inst., Department of Energy, Washington, D.C. (1981).

7. Jewell, W.J. et al., Anaerobic Fermentation of Agricultural Residue: Potential for Improvement and Implementation, Final Report, Division of Solar Technology, Department of Energy, Washington, D.C. (1978).

8. Monteith, H.D., R.J. Rush, and A.R. Stickney, Energy Production by Anaerobic Digestion of Livestock Wastes, Energo '83, Ontario's Energy Opportunities in Biomass (1983).

9. Persson, S.P.E., H.D. Bartlett, A.E. Branding, and R.W. Regan, Agricultural Anaerobic Digesters: Design and Operation, Pennsylvania Agricultural Experiment Station (1979).

10. Schellenback, S.W., W. Turnacliff, and F. Varoni, Methane on the Move: A Discussion of Small Anaerobic Digesters, Colorado Energy Research Institute (1977).

11. Smith, R.J., M.E. Hein, and T.H. Greiner, "Experimental Methane Production From Animal Excreta in Pilot-Scale and Farm-Size Units", Journal of Animal Science, 48, No. 1 (1979).

12. Stafford, D.A., "Commercial Aspects of Digestion", Methane Production from Waste Organic Matter (1980).

13. Timbers, G.E. and D. Marshall, Biogas as a Farm Energy Source, Engineering and Statistical Research Institute, Agriculture Canada, Report 1-297 (1981).

14. Thorton, T., An Assessment of Anaerobic Digestion in U.S. Agriculture, U.S. Dept. Agric. Econ. Stat. Coop. Serv. (1978).

4 APPLICATION OF ANAEROBIC DIGESTION IN THE FOOD PROCESSING INDUSTRIES

4.1 Incentives for Development

Environmental regulations and the associated costs may force some food processors to examine the energy efficiency and cost effectiveness of their waste disposal method or treatment system. The application of anaerobic technology to the food processing industries in North America is becoming an attractive method to reduce the polluting organic content (BOD_5, COD) of a waste stream to an environmentally acceptable level. The simultaneous production of biogas, which contains methane gas, provides an added economic benefit when the methane is recovered and used as a fuel.

In the past, some food processing industries have used aerobic treatment systems as the most convenient and least costly method of treating their wastes. Aerobic treatment systems were also used to satisfy environmental regulations. While comparisons between anaerobic and aerobic processes should be undertaken with caution, anaerobic treatment is being partially promoted in the food processing industries as an alternative to aerobic systems. Anaerobic systems eliminate

4 APPLICATIONS DE LA DIGESTION ANAÉROBIE À L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

4.1 Incitatifs au développement

Les règlements relatifs à l'environnement et les coûts découlant de leur application peuvent obliger certaines industries alimentaires à étudier le rendement énergétique et la rentabilité de leur méthode d'élimination ou de traitement des eaux usées. En Amérique du Nord, l'application des techniques anaérobies dans l'industrie alimentaire devient un moyen intéressant pour ramener la teneur en polluants organiques (DBO_5, DCO) de leurs eaux usées à un niveau acceptable sur le plan environnemental. La production de biogaz, qui renferme du méthane, accroît encore la rentabilité si le méthane est récupéré et utilisé comme combustible.

Certaines industries alimentaires ont utilisé une méthode aérobie pour traiter leurs eaux usées, moyen qu'elles considéraient le plus pratique et le moins coûteux. Elles ont également employé des traitements aérobies pour se conformer aux règlements sur l'environnement. Même si l'on compare prudemment les procédés aérobie et anaérobie, ce dernier a été quelque peu publicisé auprès des industries alimentaires, comme solution de rechange aux systèmes aérobies. Les systèmes anaérobies éliminent les besoins en énergie requis par l'oxygénation et, en outre, ils produisent du

the power requirements for oxygenation, and in addition, produce methane which can be used as a fuel. An anaerobic process, therefore, may produce surplus energy above the requirements of the waste treatment process.

Since the nutrient requirements of an anaerobic system are generally lower than those of an aerobic system, a waste considered nutrient deficient for aerobic stabilization may be treated anaerobically. The organism yield of an anaerobic process is only about 10% of that obtained aerobically, such that anaerobic waste sludge volumes requiring disposal are greatly reduced[1]. This reduced sludge production could translate into direct cost savings where sludge transportation and/or disposal costs are significant. The literature more fully addresses these and other issues to be considered when comparing anaerobic and aerobic treatment systems[2,3]. Combined systems using anaerobic pretreatment in association with aerobic polishing could also provide an economic and environmentally acceptable waste treatment system for specific food processing industries.

In Canada, full-scale demonstration of anaerobic facilities has been pursued with the objective of building user confidence as part of a long-term

méthane qui peut servir de combustible. Donc, un procédé anaérobie peut fournir une quantité d'énergie supérieure à celle requise par le traitement des eaux usées.

Les besoins en éléments nutritifs d'un système anaérobie sont généralement inférieurs à ceux d'un système aérobie. C'est la raison pour laquelle on peut traiter par voie anaérobie des eaux usées dont la teneur est trop faible en éléments nutritifs pour permettre une stabilisation aérobie. La production d'organismes d'un procédé anaérobie ne représente que 10 p. 100 de celui obtenu par un procédé aérobie, de sorte que le premier permet de réduire considérablement le volume des boues résiduaires anaérobies à éliminer[1]. Une moins grande formation de boues peut entraîner des économies directes lorsque les coûts du transport et(ou) d'élimination de ces boues sont importants. Certains documents traitent de façon plus complète des points à considérer lorsqu'on compare les traitements anaérobie et aérobie[2, 3]. Des systèmes mixtes alliant un traitement préliminaire anaérobie à un traitement final aérobie pourraient aussi constituer pour les industries alimentaires un moyen rentable et acceptable, du point de vue environnemental, de traiter leurs eaux résiduaires.

Au Canada, on fait des expériences, à grande échelle, sur les installations anaérobies, dans le cadre d'un programme de développement à long terme en vue d'inspirer

development program. Design and operational data is being generated through the demonstration of anaerobic technology at carefully selected sites, giving food processors an improved understanding of the capabilities, principles and benefits of an anaerobic treatment system.

confiance aux utilisateurs. On acquiert ainsi des données sur la conception et l'exploitation de ce procédé en l'appliquant à des installations soigneusement sélectionnées, ce qui permet aux industries alimentaires de comprendre les principes, les possibilités, et les avantages de ce type de traitement.

4.2 Waste Characteristics

4.2.1 Industrial Sectors. In North America, fundamental research conducted at bench scale has been reported for a variety of effluent streams within the food processing industry. In general, the waste streams studied can be classified according to the following industrial sectors:

- dairy products industry;
- fruit and vegetable processing industries;
- grain processors;
- beverage industry; and
- slaughtering and meat processors.

In the dairy products industry, wastes are primarily diluted milk resulting from the intensive washing operations required to maintain sanitary conditions. In addition, cheese manufacturers produce cheese whey, a high strength waste product. While several options are available for the

4.2 Caractéristiques des déchets

4.2.1 Secteurs industriels. - En Amérique du Nord, on a fait état de recherches fondamentales en laboratoire sur les divers effluents de l'industrie alimentaire. En général, les effluents étudiés peuvent être classés dans les catégories suivantes:

- industrie laitière,
- industrie de transformation des fruits et légumes,
- industrie de transformation des céréales,
- industrie des boissons,
- abattage et salaison.

Les eaux usées de l'industrie laitière sont essentiellement constituées de lait dilué provenant des rinçages intensifs nécessaires au respect des normes d'hygiène. En outre, les fromagers produisent du lactosérum de fromage, dont la teneur en résidus est élevée. Même s'il existe plusieurs moyens de recycler le lactosérum[4, 5], sa production est souvent

reuse of whey[4,5], the supply of whey often exceeds these demands, creating a disposal problem. Muller[6] estimated that only 52% of the produced whey was used as animal feed or disposed of through landspreading/dumping. For this reason, the anaerobic treatment of whey has received considerable attention.

A summary of the characteristics of some Canadian dairy and milk processing wastewaters is found in Stanley Assoc. Eng. Ltd.[7]. The high organic concentration of whey (30 000 to 60 000 mg/L BOD_5) makes it a suitable substrate for anaerobic treatment. The characteristics of cheese whey have been reported by Nemerow[8] and Zall[9].

In North America, several laboratory scale studies have shown adequate BOD_5 and COD removals from whey[10-14], whey permeate[15-17], cheese factory wastewaters[18, 19], and synthetic milk substrates[20, 21]. In response to industrial inquiries and proposals, pilot plant studies have been on-going since March 1982 at Environment Canada's Wastewater Technology Centre (WTC) in Burlington[22]. Based on other pilot plant results, a full-scale anaerobic system was constructed by Mid-America Dairyman Inc. one of the largest dairy cooperatives in the Mid-

supérieure à la demande, ce qui entraîne un problème d'élimination. Selon Muller[6], 52 p. 100 seulement du lactosérum produit ont servi de nourriture aux animaux, ont été épandus ou vendus à prix inférieur (dumping). C'est la raison pour laquelle le traitement anaérobie du lactosérum a suscité beaucoup d'intérêt.

La Stanley Assoc. Eng. Ltd.[7] donne un résumé des caractéristiques de certaines eaux résiduaires de laiteries canadiennes. En raison de sa concentration élevée en matières organiques (DBO_5 de 30 000 à 60 000 mg/l), le lactosérum se prête bien à un traitement anaérobie. Nemerow[8] et Zall[9] ont mentionné les caractéristiques du lactosérum de fromage.

En Amérique du Nord, plusieurs études en laboratoire ont démontré une élimination suffisante de la DBO_5 et de la DCO, du lactosérum[10 à 14], du perméat de lactosérum[15 à 17], des eaux résiduaires de fromageries[18, 19] et des substrats de lait synthétiques[20, 21]. Depuis mars 1982, le Centre technique des eaux usées d'Environnement Canada, situé à Burlington[22], étudie des installations pilotes pour répondre aux demandes d'information et aux propositions émanant des industries. La Mid-America Dairyman Inc., une des plus importantes coopératives laitières du Midwest[23] a construit un système anaérobie à grande échelle en se basant sur les résultats d'installations

Western United States[23]. Mid-America produces many dairy products including: butter, condensed milk, baby formula, dried and condensed whey, and several types of cheese (cheddar, curd, provolone, and mozzarella). In Canada, two full-scale systems treating cheese whey and wastewater have been constructed and evaluated. Agropur, a major Quebec agricultural co-operative, has constructed an anaerobic system at it's Notre-Dame-du-Bon-Conseil plant[24,25]. This plant processes approximately 1000 tonnes of milk daily, producing cheddar cheese, curd, powdered skim milk and cream by-products. In the past, the effluent discharge consisted of 1500 to 1800 m^3/d flow, 2000 to 3000 kg/d BOD_5 and 4000 to 6000 kg/d COD. The second Canadian anaerobic digestion system at Millbank Cheese and Butter Ltd. is treating cheese whey only[26].

In the fruit and vegetable processing industry, the major wastewaters are produced by washing, chilling, scalding or blanching operations. Due to the seasonal nature of agricultural products processing, some of the fruit and vegetable processing industries do not generate wastewater at a constant rate. A treatment plant, therefore, may be shut down and restarted one or more times during the

pilotes. Dans le centre des États-Unis, on fabrique des produits laitiers, entre autres: beurre, lait condensé, préparations pour bébés, lactosérum en poudre et condensé, ainsi que plusieurs types de fromages (cheddar, caillé, provolone et mozzarella). Au Canada, on a construit et évalué deux systèmes à grande échelle qui traitent le lactosérum et les eaux résiduaires de fromageries. Agropur, une importante coopérative agricole québécoise, a construit un système anaérobie à son usine de Notre-Dame-du-Bon-Conseil[24, 25]. Cette usine traite environ 1000 tonnes métriques de lait quotidiennement et fabrique du fromage cheddar, du caillé, de la poudre de lait écrémé et des sous-produits de la crème. Anciennement, les effluents avaient un débit de 1500 à 1800 m^3/d, une DBO_5 de 2000 à 3000 kg/d et une DCO de 4000 à 6000 kg/d. Le deuxième système canadien de digestion anaérobie, celui de la Millbank Cheese and Butter Ltd., ne traite que le lactosérum de fromage[26].

La plupart des eaux résiduaires de l'industrie de transformation des fruits et légumes proviennent du lavage, du refroidissement, de l'ébouillantage ou du blanchiment. En raison de la nature saisonnière de leurs opérations, certaines industries de transformation des fruits et légumes ne produisent pas d'eaux résiduaires à un rythme constant. Le fonctionnement d'une usine de traitement peut donc être interrompu puis reprendre une ou plusieurs fois dans l'année. Les systèmes anaé-

year. Anaerobic systems are capable of coping with such circumstances, as proven in the Netherlands by anaerobic systems operating successfully on seasonal sugar beet processing wastewaters[27]. The sludge blanket reactors are kept dormant at ambient temperatures for up to nine months when the sugar plants are idle. When feeding is resumed, the system achieves full loading within two weeks.

In terms of total plant effluent, the COD of fruit and vegetable processing wastewaters is generally less than 2000 mg/L, at the lower end of the practical range for high rate anaerobic treatment[3]. However, certain industries and processes produce much stronger wastewaters. The high COD wastes produced by the potato industry are well suited for anaerobic treatment. Bean blanching wastewaters have a much higher organic strength when compared to total bean processing wastes.

Bean blanching wastewater has been used extensively as a representative substrate in Canadian research directed toward the optimization of the high rate reactors[28-33]. Numerous lab and bench scale studies have been conducted using clarified potato wastewater[34-40], in order to obtain

robies sont en mesure de faire face à de telles situations; par exemple aux Pays-Bas, les eaux résiduaires de sucreries sont traitées de façon satisfaisante sur une base saisonnière. On maintient les réacteurs à lit de boues à la température ambiante pendant des périodes allant jusqu'à neuf mois, pendant le ralentissement de production des sucreries. Lorsque la production reprend, le système de traitement des eaux atteint sa pleine capacité en deux semaines.

Si l'on considère l'effluent total, la DCO des eaux résiduaires du traitement des fruits et légumes est généralement inférieure à 2000 mg/l, c'est-à-dire à la valeur minimale de la plage correspondant au traitement anaérobie à forte charge[3]. Toutefois, certaines industries et certains procédés produisent des eaux dont la teneur en résidus est plus concentrée. Les résidus de l'industrie de la pomme de terre, dont la DCO est élevée, se prêtent bien à un traitement anaérobie. Les eaux usées du blanchiment des haricots ont une teneur en matières organiques beaucoup plus élevée que les eaux résiduaires de toutes les opérations de traitement des haricots.

Au Canada, on a largement utilisé les eaux résiduaires du blanchiment des haricots comme substrats représentatifs dans certaines recherches visant à optimiser le rendement des digesteurs à forte charge[28 à 33]. De nombreuses études expérimentales et en laboratoire ont été effectuées sur les eaux résiduaires clarifiées du traitement de la

information to assist in the design, construction and operation of full-scale systems in the Atlantic provinces[41-43], and the United States[44, 45]. At the Hardee Farms International vegetable processing plant, the full-scale anaerobic treatment facility was taken out of service when the plant closed permanently in 1985. Design criteria, start-up experience and preliminary operating data was obtained prior to closure[43, 46].

In the grain processing industry, the refining of various grains such as corn, wheat and soybeans involves a number of unit operations such as washing, evaporation, extraction and filtration. The process wastewaters resulting from these operations normally contain high concentrations of suspended and soluble carbohydrates and proteins, with COD and total suspended solids levels ranging from 8000 to 35 000 mg/L and 5000 to 15 000 mg/L, respectively. In most instances, pilot plant studies of grain processing effluent have been carried out to determine the treatability of specific wastestreams, prior to the decision to construct a full-scale anaerobic system[44, 47-51]. In Canada, one full-scale system is currently operating on wheat starch processing waste at the Industrial Grain

pomme de terre[34 à 40], afin d'obtenir des données nécessaires à la conception, à la construction et au fonctionnement de systèmes à grande échelle, tant dans les provinces de l'Atlantique[41 à 43] qu'aux États-Unis[44, 45]. Le système de traitement anaérobie à grande échelle de la Hardee Farms International (qui traite les légumes) a été mis hors service lorsque l'on a fermé l'usine en 1985. Avant sa fermeture, on avait obtenu des informations sur les critères de conception, sur le démarrage et sur les données préliminaires de fonctionnement[43, 46].

Dans l'industrie de transformation des céréales, le traitement de diverses céréales, par exemple le mais, le blé et le soja, comporte un certain nombre d'opérations distinctes comme le lavage, l'évaporation, l'extraction et la filtration. Les eaux résiduaires résultant de ces opérations ont normalement des teneurs élevées en glucides et en protéines en suspension et solubles, et les plages de leur DCO et de leurs teneurs en matières solides en suspension sont respectivement de 8000 à 35 000 mg/l et de 5000 à 15 000 mg/l. Dans la plupart des cas, on a étudié l'effluent d'installations pilotes de transformation des céréales pour déterminer la possibilité de traitement d'eaux résiduaires spécifiques, avant de prendre la décision de construire un système anaérobie à grande échelle[44, 47 à 51]. Au Canada, l'installation de l'Industrial Grain Products Ltd. (IGP) de Thunder Bay (Ontario)[52] exploite actuellement un système à grande échelle qui traite

Products Ltd. (IGP) plant in Thunder Bay, Ontario[52].

Within the beverage industry, distillery, brewery and soft drink manufacturing wastestreams have been identified as suitable substrates for anaerobic treatment. According to Dearborn[53], distillery wastewater primarily results from equipment washing and spills that occur during bottling and material handling operations. Recently, anaerobic pilot plant studies have been conducted using stillage[54], and corn ethanol[55], as substrates. Although stillage is a high strength effluent with up to 25 000 mg/L BOD_5, 4 to 6% total solids, most North American distilleries currently practice stillage recovery. Brewery wastes are composed mainly of liquor pressed from wet grain, liquor from yeast recovery, and wash water. A brief overview by Keenan and Kormi[56] characterizes the energy and wastewater treatment considerations of the brewery industry, providing reference to several other studies. On average, brewery effluents are not a high strength waste, with an industry mean of 1500 mg/L BOD_5[53]. The full-scale system installed at the G. Heilman Brewing Company operates on brewery effluent with soluble COD of approximately 2000 mg/L, 220 mg/L total suspended solids

les résidus de la transformation de l'amidon de blé.

Dans le domaine de l'industrie des boissons, on reconnaît que les eaux résiduaires des distilleries, des brasseries et de la fabrication des eaux gazeuses conviennent bien à un traitement anaérobie. Selon Dearborn[53], les eaux usées de distilleries proviennent essentiellement du lavage du matériel et des déversements se produisant au cours de la mise en bouteille et de la manutention du matériel. Récemment, on a effectué des études sur des installations pilotes de traitement anaérobie en utilisant comme substrats des résidus de distillation[54] et de l'éthanol de maïs[55]. Même si les résidus de distillation constituent un effluent très concentré dont la DBO_5 atteint 25 000 mg/l, et 4 p. 100 à 6 p. 100 pour les matières solides totales, la plupart des distilleries d'Amérique du Nord recyclent couramment ces résidus. Les déchets de brasserie sont surtout constitués de la liqueur de pressage du grain humide, de la liqueur provenant de la récupération de la levure et de l'eau de lavage. Keenan et Kormi[56] ont rédigé un bref aperçu des besoins en énergie et du traitement des eaux résiduaires de brasserie en se référant à plusieurs autres études. En moyenne, les effluents de brasserie ne sont pas aussi concentrés, puisque leur DBO_5 est de 1500 mg/l[53]. Le système à grande échelle de la G. Heilman Brewing Company traite les effluents de brasserie dont la DCO soluble est d'environ 2000 mg/l et la teneur en matières solides totales en suspension (MSTS) de

(TSS)[44, 57, 58]. While the waste characteristics of soft-drink and carbonated beverage operations are reported in the literature[59], few studies concerning the anaerobic treatment of these wastes have been reported[60].

In the slaughtering and meat packing industry, anaerobic lagoons constructed in the early 1960's were one of the earliest industrial applications of conventional anaerobic systems[61, 62]. However, with the current emphasis on high rate systems, the focus of anaerobic research and development activity has shifted to include a wider variety of food processing industries. One high rate treatability study has been conducted on the J.M. Schneiders meat packing and rendering plant effluent using a mobile pilot plant trailer[63]. In addition, one recent pilot plant study evaluates the treatment of complex slaughterhouse wastewater in an anaerobic filter[64].

4.2.2 Nutrient Availability/Pretreatment. In the anaerobic treatment of food processing industrial wastestreams, chemical inputs may be required to adjust pH and provide buffer capacity. Controlling the pH during start-up of an anaerobic reactor is particularly important since methane bacteria will not develop

220 mg/l[44, 57, 58]. Même si l'on a signalé dans la documentation les caractéristiques des résidus de fabrication des boissons gazeuses et des eaux gazéifiées, peu d'études ont porté sur le traitement anaérobie de ces résidus[60].

Dans le domaine de l'industrie de l'abattage et de la salaison, l'une des premières applications industrielles des systèmes anaérobies classiques a été la construction, au début des années 1960, d'étangs anaérobies[61, 62]. Cependant, comme on s'intéresse surtout actuellement aux systèmes à forte charge, la recherche et le développement en matière de procédés anaérobies incluent une plus grande diversité d'industries alimentaires. Toutefois, on a entrepris une étude sur le traitement à forte charge des effluents de salaison et d'équarrissage de la société J.M. Schneiders en utilisant une installation pilote mobile[63]. En outre, une étude récente d'une installation pilote évalue le traitement des eaux résiduaires complexes d'abattage avec un filtre biologique anaérobie[64].

4.2.2 Disponibilité en éléments nutritifs et pré-traitement. - Le traitement anaérobie des effluents industriels d'origine alimentaire exige un apport de produits chimiques pour ajuster le pH et assurer une capacité tampon. Le contrôle du pH au cours de la mise en route d'un réacteur anaérobie est particulièrement important car les bactéries méthanogènes ne se multiplient pas lorsque le pH est inférieur à

below a pH of 6.7. In addition, nutrient supplements may be required to satisfy the synthesis needs of the anaerobic bacteria. In comparison to an aerobic process, the nutrient requirements of an anaerobic process are lower. However, an aerobic system does not normally require pH adjustment. For both anaerobic and aerobic processes, the quantity of nutrients required is determined by the specific deficiencies of the waste stream being treated.

Chemical inputs used in lab scale studies of anaerobic systems include: sodium hydroxide, calcium hydroxide, ammonia chloride, ammonium dibasic phosphate, potassium bicarbonate, and sodium bicarbonate. In both research and full-scale application, sodium bicarbonate and sodium hydroxide are the most common chemicals used to maintain alkalinity. In anaerobic reactors, the volatile acids : alkalinity ratio should be in the range of 0.3 : 0.4(65).

Pretreatment practices, including the addition of nutrients or alkalinity, can have a significant impact on the operation of full-scale anaerobic systems. For example, at the Centennial Mills wheat starch plant, the use of anhydrous ammonia as a nitrogen source caused a build-up of hard precipitate in the filter pumps,

6,7. En outre, les besoins de synthèse des bactéries anaérobies peuvent nécessiter l'apport de suppléments d'éléments nutritifs. Les besoins en éléments nutritifs d'un procédé anaérobie sont inférieurs à ceux d'un procédé aérobie, mais ce dernier ne demande généralement pas d'ajustement du pH. Pour les deux types de procédés, la quantité d'éléments nutritifs nécessaire est dictée par les déficiences des résidus faisant l'objet du traitement.

Les composés chimiques ajoutés, dans le cadre d'études en laboratoire, sont les suivants: hydroxyde de sodium, hydroxyde de calcium, phosphate dibasique d'ammonium, bicarbonate de potassium et bicarbonate de sodium. À des fins de recherche et d'application à grande échelle, on utilise le plus souvent le bicarbonate de sodium et l'hydroxyde de sodium pour maintenir l'alcalinité. Dans le cas des réacteurs anaérobies, le rapport entre les acides volatils et l'alcalinité doit être de l'ordre de 0,3 à 0,4(65).

Les traitements préliminaires, y compris l'addition d'éléments nutritifs ou de substances alcalines, peuvent avoir des répercussions importantes sur le fonctionnement des systèmes de traitement anaérobie à grande échelle. Par exemple, à la Centennial Mills qui fabrique de l'amidon de blé, l'emploi d'ammoniac anhydre comme source d'azote a entraîné l'accumulation d'un précipité sur les

which eventually resulted in a shut-down for cleaning. When the liquid ammonia was replaced by pelletized urea, no further problems of this nature were experienced.

At the G. Heilman Brewing Company, urea is added as a nitrogen source, while phosphorus is supplied as monosodium phosphate. One of the operational problems was attributed to the lack of preacidification/flow buffering capacity to counteract extreme fluctuations in brewery wastewater pH. As a result, the flow pattern was modified to include a pre-acidification flow buffer vessel.

Due to the variation in flow rate, strength, and pH of dairy wastes, it has been stated that equalization of these wastes is necessary to provide a sufficiently uniform waste for anaerobic treatment. At the Agropur Co-operative, the equalization tank did prove to be an important feature of the treatment process, with two main problems identified: periodic high pH resulting from the dump of caustic wash waters; and the inability of the pH control system to respond to spills. The pH in the equalization basin was effectively controlled after an outside acid storage tank and a silo for hydrated lime had been installed. However, changes in the COD and volatile acids concentration in the

pompes du filtre et il a fallu interrompre le procédé pour les nettoyer. Le remplacement de l'ammoniac par des pastilles d'urée a définitivement éliminé les problèmes de cette nature.

La société G. Heilman Brewing a utilisé de l'urée comme source d'azote et du phosphate monosodique comme source de phosphore. On a imputé l'un des problèmes de fonctionnement à l'absence de pré-acidification/capacité tampon pour contrecarrer les variations extrêmes du pH des eaux usées de brasserie. En conséquence, on a modifié le procédé pour inclure un réservoir tampon de pré-acidification.

En raison de la variation du débit, de la charge et du pH des résidus de laiterie, on a affirmé qu'il fallait assurer un équilibre des résidus et les stabiliser suffisamment pour le traitement anaérobie. En effet, à la coopérative Agropur, le bassin de stabilisation s'est révélé un élément important du procédé de traitement et on a identifié deux problèmes principaux: un pH périodiquement élevé causé par l'entrée dans le système d'eaux de lavage caustiques et l'impossibilité de contrôler le pH par le système ou de faire face aux déversements accidentels. On a réussi à contrôler efficacement le pH d'un bassin de stabilisation après avoir installé un réservoir extérieur de stockage des matières acides et un silo pour la chaux hydratée. Cependant, les modifications de la DCO et de la concentration des acides volatils dans le réservoir de stabilisation à la

equalization tank associated with whey spills continued to cause operating difficulties for one (UASB) of the two reactor configurations.

At the Hardee Farms Ltd. installation, it was concluded that it is not practical to start up the anaerobic reactor without the benefit of a continuous alkalinity feed. Methods for minimizing the alkalinity requirements should be investigated according to these results. Some of the initial problems experienced at Millbank Cheese and Butter concerned the maintenance of digester pH. Initially, caustic soda (NaOH) was used to control pH, but this proved costly and ineffective. Effluent from a full-scale digester at a hog farm was then obtained, and at additions of 10%, more positive results were evident.

One factor contributing to the slow start-up of the ANAMET* process at Industrial Grain Products Ltd. was believed to be micro-nutrient deficiencies in the wastewater, particularly iron. Chemical additions were being initiated to alleviate this problem.

Most full-scale anaerobic systems treating food processing effluent have been designed to operate at a mesophilic temperature between 30°C and 35°C. Depending on the temperasuite de déversements accidentels de lactosérum ont continué à entraîner des difficultés de fonctionnement dans le cas de l'un des deux modèles de réacteurs (à lit de boues à courant ascendant).

Hardee Farms Ltd. a conclu qu'il n'était pas pratique de faire fonctionner le réacteur anaérobie sans assurer une alimentation continue en substances alcalines, et qu'il fallait étudier les moyens de minimiser les besoins en alcalinité. Certaines des difficultés initialement éprouvées à la Millbank Cheese and Butter avaient trait au maintien du pH dans le digesteur. On utilisait initialement de la soude caustique (NaOH) pour contrôler le pH, mais le procédé s'est avéré coûteux et inefficace. Cependant on a obtenu des résultats manifestement meilleurs avec des additions de 10 p. 100 de soude caustique dans l'effluent d'un digesteur à grande échelle de porcherie.

L'un des facteurs contribuant au lent démarrage du procédé ANAMET* chez Industrial Grain Products Ltd. a été, pense-t-on, le manque en micro-éléments nutritifs des eaux résiduaires, particulièrement en fer. On a commencé à ajouter des produits chimiques pour remédier à ce problème.

La plupart des systèmes de traitement anaérobie à grande échelle qui traitent des effluents d'industries alimentaires ont été conçus pour fonctionner à une température mésophile comprise entre 30 °C et 35 °C.

ture of the industrial effluent, supplemental preheating of the waste stream may or may not be required. In application, methods used to raise the temperature of the reactor influent have included influent/effluent heat exchangers, hot water to influent heat exchangers and the injection of steam into the wastewater. At least some food processing wastewaters are discharged at sufficiently high temperatures so that supplemental preheating is not required for anaerobic treatment[3].

4.3 Process Systems and Performance

4.3.1 Developments at the National Research Council of Canada. At the National Research Council of Canada (NRCC), numerous studies concerning the anaerobic digestion of biomass wastes have been conducted. A substantial amount of the work at the NRCC has been of a long-term nature[66], ranging from the isolation, characterization, and nutrient requirements of methanogens[67-73]; to enzymatic studies[74, 75]; to the factors affecting the rate of cellulose breakdown in an anaerobic system[76, 77]. More recently, the focus of the NRCC program has been the development and optimization of the DSFF high rate reactor[78-85], using primarily bean

Selon la température de l'effluent industriel, il peut être nécessaire ou non d'effectuer un préchauffage des résidus. En pratique, les méthodes destinées à augmenter la température de la charge dans le réacteur comportent l'échange de chaleur entre l'influent et l'effluent, le pompage d'eau chaude vers les échangeurs de chaleur de l'influent et l'injection de vapeur dans les eaux usées. Du moins, certaines eaux résiduaires d'industries alimentaires sont déversées à une température suffisamment élevée pour qu'il n'y ait pas à procéder à un préchauffage en vue du traitement anaérobie[3].

4.3 Systèmes de traitement et rendement

4.3.1 Réalisations du Conseil national de recherche du Canada. - De nombreuses études sur la digestion anaérobie des résidus de la biomasse ont été entreprises par le Conseil national de recherche du Canada (CNRC). Un nombre important de travaux à long terme ont été effectués[66]: confinement, caractérisation et besoins en éléments nutritifs des bactéries méthanogènes[67 à 73]; études des enzymes[74, 75]; facteurs modifiant la vitesse de dégradation de la cellulose dans un système anaérobie[76, 77]. Plus récemment, le programme du CNRC a été consacré à l'élaboration et à l'optimisation du réacteur à lit bactérien à courant descendant à forte charge, en utilisant principalement des résidus du blanchiment des haricots ou des substrats synthétiques de sucres/glucides.

blanching wastes or synthetic sugar/carbohydrate substrates as representative food processing wastes.

4.3.2 Digester Design. A summary of the experimental and full-scale applications of anaerobic treatment in the food processing industries has been presented by Pohland and Harper(86). This data provides an indication of the preferability of the high rate advanced reactors, arising from the soluble nature of food processing wastes. More than 75% of all full-scale applications have used one of the high rate reactor types. In general, there has been no distinct preference for any one of the high rate configurations (contact, fixed-film, sludge bed, or fluidized bed). The suggested minimum level of influent COD suitable for high rate anaerobic treatment is 1000 to 2000 mg/L.

The recommended loading rate range for the contact reactors is 2 to 10 kg COD/m^3·d^{-1}(80), as removal efficiency drops at loadings of 20 to 40 kg COD/m^3·d^{-1}(88). Performance data is available for both pilot and full-scale contact reactors, treating a range of wastes from 3 to 55 g/L COD(89). A full-scale contact reactor is used in the combined anaerobic-aerobic ANAMET* treatment system at Industrial Grain Products Ltd.(52).

4.3.2 Conception du digesteur. - Pohland et Harper(86) ont présenté un résumé des applications expérimentales et pratiques du traitement anaérobie dans l'industrie alimentaire. D'après leurs données, il est préférable d'utiliser des réacteurs perfectionnés à forte charge en raison de la nature soluble des déchets alimentaires. Plus de 75 p. 100 de toutes les applications à grande échelle ont utilisé l'un des modèles de réacteurs à forte charge. En général, on n'a pas établi de préférence nette pour l'un quelconque des modèles à forte charge (de contact, à lit bactérien, à lit de boues ou à lit fluidisé). On propose une DCO minimale de l'influent de 1000 à 2000 mg/l pour un traitement anaérobie à forte charge.

La plage recommandée des débits d'alimentation des réacteurs de contact est de 2 à 10 kg DCO/$m^3 \cdot d^{-1}$(80), car l'efficacité d'élimination chute si les charges sont de 20 à 40 kg DCO/$m^3 \cdot d^{-1}$(88). On dispose de données sur le rendement des réacteurs à échelle pilote et à grande échelle qui traitent des déchets dont la DCO varie de 3 à 55 g/l(89). L'Industrial Grain Products Ltd.(52) utilise un réacteur de contact à grande échelle dans un système de traitement combiné anaérobie-aérobie ANAMET*. La McCain

At McCain Foods Ltd., an anaerobic contact process with effluent clarification has been designed and constructed for the treatment of potato processing wastes[43].

The range of COD loadings accommodated by the upflow anaerobic filter is 5 to 15 kg/m^3·d^{-1}, with optimum reactor performance when influent suspended solids amount to less than 500 mg/L[87]. Suitable filter media which have been used include raschig rings, flexirings, rock and plastic packings. At Centennial Mills, a rock filter was used to successfully treat a high strength wheat starch-gluten plant waste[47, 48]. At Hardee Farms Ltd., a combined contact-filter reactor was one stage in a four part treatment sequence. Munters PLASdek* crossflow plastic packing was used as the filter media to evenly distribute the incoming wastewater and provide a surface for organism growth[46].

The downflow fixed-film reactor is similar to the anaerobic filter in terms of loading and hydraulic retention time. Although this reactor design is less subject to clogging than the filter, solids accumulation at the bottom of the reactor may become an

Foods Ltd. utilise un procédé de contact anaérobie comportant une clarification des effluents; cette installation a été conçue et aménagée pour traiter les résidus de la transformation des pommes de terre[43].

Le filtre biologique anaérobie à courant ascendant peut accepter des charges en DCO de 5 à 15 kg/m^3 · d^{-1}, et le rendement optimal du réacteur est atteint quand la concentration des matières solides en suspension de l'influent est inférieure à 500 mg/l[87]. On a employé des milieux filtrants appropriés, entre autres des anneaux de raschig, des anneaux "flexiring", et des matériaux de garnissage comme la roche ou le plastique. La Centennial Mills a utilisé de façon satisfaisante un milieu filtrant rocheux pour traiter les résidus à concentration élevée d'une installation d'amidon-gluten de blé[47, 48]. Chez Hardee Farms Ltd., un réacteur combiné contact-filtre était une des étapes d'un processus de traitement en comportant quatre. Le filtre à garnissage de matières plastiques à flux horizontal de Munters PLASdek* a servi de milieu filtrant pour répartir uniformément les eaux résiduaires qui entrent et fournir une surface permettant la prolifération de bactéries[46].

Le réacteur à lit bactérien à courant descendant est semblable à celui du filtre biologique anaérobie, en ce qui a trait à la charge et au temps de séjour hydraulique. Même si ce modèle de réacteur est moins sujet au colmatage que le filtre, l'accumulation de matières solides au fond du réacteur peut

operational problem. At the Agropur Co-operative, 60% of the initial reactor volume became inactive after only 18 months of operation. Some of this may be attributed to the imperfect vertical alignment of the clay block medium. The fixed-film reactors are considered to be the most stable high-rate reactor. Unlike the UASB, the fixed-film reactor at Agropur was unaffected by variation in pH and COD in the equalized dairy wastewater[24, 25].

The UASB reactors have obtained the highest COD loadings in operation, with a loading rate range of 0.5 to 40 kg COD/$m^3 \cdot d^{-1}$. The hydraulic retention time of the UASB reactor is generally less than one day. In general, the mechanisms responsible for the formation of the granular sludge in a UASB reactor are not well understood. One of the rumored concerns of UASB technology has been the ability to retain biomass. It has been stated, however, that loss of the sludge bed has never occurred in any of the three dozen Biothane* UASB systems in operation throughout the world[58], including the full-scale systems at the G. Heilman Brewery[57], the Colby Cooperative, and Ore-Ida Foods Inc.[44] At Agropur, large amounts of granular sludge were lost

perturber son fonctionnement. À la coopérative Agropur, 60 p. 100 du volume initial du réacteur sont devenus inactifs après seulement 18 mois d'exploitation. Cela peut être imputé partiellement à l'alignement vertical imparfait du milieu constitué de blocs d'argile. Les réacteurs à lit bactérien sont, estime-t-on, les réacteurs à forte charge les plus stables. Contrairement aux réacteurs anaérobies à lit de boues le fonctionnement du réacteur à lit bactérien d'Agropur n'a pas été modifié par le changement du pH et de la DCO après passage des eaux résiduaires de laiterie dans le bassin de stabilisation[24, 25].

Les réacteurs anaérobies à lit de boues sont ceux dont la charge a été la plus élevée en DCO pendant le fonctionnement, le débit de charge variant de 0,5 à 40 kg DCO/$m^3 \cdot d^{-1}$. Le temps de rétention hydraulique d'un tel réacteur est généralement inférieur à un jour. En général, on n'a pas encore bien éclairci les mécanismes responsables de la formation de boues granuleuses dans un appareil de ce type. L'un des avantages qui jouent en faveur des réacteurs anaérobies à lit de boues est leur capacité de rétention de la biomasse. Toutefois, on a affirmé qu'il n'y a jamais eu de perte des matières du lit dans le cas des 36 systèmes Biothane* fonctionnant dans le monde entier[58], y compris les systèmes à grande échelle de la brasserie G. Heilman[57], de la coopérative Colby et de la Ore-Ida Foods Inc.[44]. À la coopérative Agropur, on a perdu des quantités importantes de boues granuleuses du réacteur anaérobie à lit de boues à

from the UASB reactor due to overloading and the presence of milk fat which increased the tendency of the sludge to float.

A number of large pilot and demonstration fluidized bed reactors have been designed and operated[50, 90, 91]. However, only one full-scale fluidized bed system has been designed and constructed in North America. At the Grain Processing Corporation, a fluidized bed system has been constructed for the anaerobic treatment of soy whey.

Although the recent emphasis has been toward the use of the high-rate reactors for the treatment of food processing wastes, standard rate reactors, such as the complete-mix digester, have also been used in full-scale demonstration[26]. A complete-mix reactor with a new ultrafiltration membrane is being developed by Dorr-Oliver, with several pilot plant results available[49, 92-94]. A Bulk Volume Fermenter (BVF)[23, 42] and covered lagoons[43, 45] have also been used in the full-scale treatment of food processing wastestreams. Work done at the Institute of Gas Technology (IGT) to develop the two-phase digestion process is presented by Ghosh and Klass[95], including a discussion of the pilot and full-scale plants in Belgium and West Germany[96].

cause de la surcharge et du fait que la présence de matières grasses du lait a augmenté la tendance des boues à rester en suspension.

On a conçu et mis en exploitation un certain nombre de grands réacteurs à lit fluidisé, à l'échelle pilote et expérimentale[50, 90, 91]. Cependant, un seul système à lit fluidisé à grande échelle a été conçu et construit en Amérique du Nord. La Grain Processing Corporation utilise un système à lit fluidisé construit pour le traitement anaérobie du lactosérum de soja.

Bien que l'on ait récemment mis en valeur l'utilisation de réacteurs à forte charge pour traiter les résidus des industries alimentaires, on a déjà éprouvé en conditions réelles des réacteurs à charge moyenne comme le digesteur à mélange intégral[26]. Dorr-Oliver a élaboré un réacteur à mélange intégral doté d'une nouvelle membrane d'ultra-filtration et a relevé des résultats dans plusieurs installations pilotes[49, 92 à 94]. On a également employé un fermenteur à grand volume (FGV)[23, 42] et des bassins couverts[43, 45] au cours du traitement à grande échelle d'eaux résiduaires alimentaires. Ghosh et Klass[95] présentent les travaux effectués à l'Institute of Gas Technology (IGT) pour mettre au point un procédé de digestion en deux étapes, y compris une étude des installations pilotes et à grande échelle en Belgique et en Allemagne de l'Ouest[96].

4.3.3 Biogas Production, Quality and Utilization. The biogas production ratio from anaerobic reactors treating industrial food wastes has ranged from 1 to 10 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ (volume of gas per reactor volume per day). In full-scale systems, the gas production ratio is usually less than 5 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$.

The biogas produced from food processing effluent is similar in composition to biogas produced from agricultural manures, containing methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2), water vapour (H_2O), hydrogen sulphide (H_2S), and other trace gases. The biogas produced from food processing wastes has contained 60 to 80% methane in both experimental and full-scale systems. In general, the methane yield depends on a number of factors, including waste composition, temperature, hydraulic residence time, solids retention time and organic loading. The maximum theoretical yield of methane possible is 0.35 m^3/kg COD removed.

The percentage of carbon dioxide in biogas is primarily related to the alkalinity/pH in the reactor. At high pH levels (f7.0), the gas released is more predominantly methane than at lower pH levels.

4.3.3 Production, qualité et utilisation du biogaz. - La production du biogaz par des digesteurs anaérobies d'eaux résiduaires de l'industrie alimentaire varie de 1 à 10 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$ (volume de gaz produit par volume de résidus traités dans le réacteur par jour). Dans les systèmes à grande échelle, le rapport de production de gaz est généralement inférieur à 5 $m^3/m^3 \cdot d^{-1}$.

La composition du biogaz produit à partir d'effluents de traitements de l'industrie alimentaire est semblable à celle du biogaz produit à partir de déchets agricoles: méthane (CH_4), dioxyde de carbone (CO_2), vapeur d'eau (H_2O), hydrogène sulfuré (H_2S) et autres gaz à l'état de traces. Le biogaz produit à partir de résidus alimentaires contient de 60 p. 100 à 80 p. 100 de méthane, qu'il s'agisse de systèmes expérimentaux ou à grande échelle. En général, le rendement en méthane dépend d'un certain nombre de facteurs, dont la composition des résidus, la température, le temps de rétention hydraulique, le temps de séjour des matières solides et la charge en matières organiques. Le rendement théorique maximal du méthane peut être de 0,35 m^3/kg de DCO éliminée.

Le pourcentage de dioxyde de carbone dans le biogaz est essentiellement lié au pH dans le réacteur. À pH élevés (f 7,0), le gaz rejeté est plus souvent du méthane qu'à pH faibles.

Hydrogen sulphide is an undesirable component of biogas due to its highly corrosive properties. At the full-scale G. Heilman Brewery installation, ferric chloride was being added to the wastewater prior to treatment in order to decrease the hydrogen sulphide concentration produced during the conversion process. The composition of the biogas was 75% CH_4, 20% CO_2, 4.9% H_2O vapour and 0.1% H_2S by analysis. During start-up of the Centennial Mills anaerobic filter, a characteristic hydrogen sulphide odour was present, but no effects were noted.

In comparison to the agricultural sector, most food processing industries are more adequately suited to utilize biogas because the heat/energy produced is more easily incorporated into plant operation. Biogas is most efficiently used to fuel a steam boiler, providing steam for digester heating, if required, and other in-plant uses. For example, at the G. Heilman Brewery, a steam boiler fuelled by biogas is used to satisfy other end uses within the plant, with excess biogas flared to the atmosphere. At the Colby Cooperative Starch Company, the biogas produced will be used in the drying operations. At Millbank Cheese[26], a steam boiler operating on biogas is being used to supply diges-

L'hydrogène sulfuré est un élément indésirable du biogaz en raison de ses propriétés extrêmement corrosives. Chez G. Heilman Brewery, qui a une installation à grande échelle, on a ajouté du chlorure ferrique aux eaux résiduaires avant leur traitement, en vue de diminuer la concentration d'hydrogène sulfuré produit au cours du traitement. La composition du biogaz était la suivante: 75 p. 100 de CH_4, 20 p. 100 de CO_2, 4,9 p. 100 de vapeur de H_2O et 0,1 p. 100 de H_2S. Durant la mise en route du filtre anaérobie de la Centennial Mills, on a noté la présence d'une odeur caractéristique d'hydrogène sulfuré, mais aucun effet.

La plupart des industries alimentaires sont plus en mesure d'utiliser le biogaz que le secteur agricole car la chaleur ou l'énergie produite est plus facilement intégrée au fonctionnement de l'installation. L'utilisation du biogaz comme combustible de chaudière permet d'améliorer la rentabilité car on peut chauffer le digesteur avec la vapeur obtenue et utiliser celle-ci à d'autres fins dans l'entreprise. Par exemple, la G. Heilman Brewery utilise une chaudière à vapeur alimentée au biogaz pour d'autres fins, et l'excès de biogaz est brûlé dans l'atmosphère. À la société Colby Cooperative Starch, le biogaz produit sera utilisé pour les opérations de séchage. La Millbank Cheese[26] utilise une chaudière à vapeur fonctionnant au biogaz pour fournir de la chaleur au digesteur et pour satisfaire à d'autres besoins de la fromagerie.

ter heat and meet other steam requirements within the cheese plant.

Experimental demonstration work was underway at Hardee Farms Ltd. to generate electrical energy by burning biogas in an engine. The radiator heat was to be used to heat the anaerobic reactor, making the entire wastewater treatment facility energy self-sufficient.

4.3.4 Effluent Quality and Disposal. Anaerobic systems have achieved COD removals ranging from 65% to 95%. The optimal removal efficiency is a function of the influent waste concentration, with an increasing purification achieved at higher strength loadings. Although aerobic treatment systems may be capable of producing a higher quality effluent, the total removals for the aerobic and anaerobic systems will be similar when the influent wastewater is highly concentrated(3).

The sludge volumes produced by an anaerobic process are significantly lower than that produced by an aerobic process. Since an anaerobic process primarily converts organics to methane and carbon dioxide, only about 5% of the COD removed is converted to sludge. Most of the COD removed aerobically is converted to sludge.

Des travaux expérimentaux ont été réalisés chez Hardee Farms Ltd. pour produire de l'énergie électrique en utilisant le biogaz comme carburant pour alimenter un moteur. On devait utiliser la chaleur du radiateur de l'installation pour chauffer le réacteur anaérobie, en permettant ainsi d'assurer l'autonomie énergétique à toute l'installation de traitement des eaux résiduaires.

4.3.4 Qualité de l'effluent et élimination. - Le procédé anaérobie a permis d'éliminer de 65 p. 100 à 95 p. 100 de la DCO. On a établi que le rendement optimal dépendait de la teneur en résidus de l'influent, et l'épuration était d'autant plus grande que les charges étaient plus concentrées. Même si les systèmes de traitement aérobie peuvent produire un effluent de meilleure qualité, on obtient le même degré d'élimination lorsqu'on combine le traitement aérobie au traitement anaérobie, si la teneur en résidus des eaux à traiter(3) est très élevée.

Les volumes de boues provenant d'un procédé anaérobie sont nettement moins importants que ceux obtenus par un procédé aérobie. Comme le premier procédé consiste essentiellement à convertir les matières organiques en méthane et en dioxyde de carbone, environ 5 p. 100 seulement de la DCO éliminée est convertie en boues. En revanche, la plus grande partie de la DCO éliminée par un système de traitement aérobie est convertie en boues.

When highly concentrated wastes are treated anaerobically, even a high COD reduction of 90 to 95% will leave a high organic concentration in the effluent. If a high quality effluent is required for discharge to a municipal sewer or natural waterway, or for landspreading/irrigation, a second-stage aerobic polishing step may be used. This approach has been used at several full-scale anaerobic installations.

At Agropur Co-operative, the performance evaluation showed that up to 90% of the total COD in the dairy wastewater could be removed anaerobically. Two aerated polishing basins, operated in series, and two settling basins were used to polish the anaerobic effluent prior to direct discharge of the treated effluent to the Nicolet River. The final effluent from the combined aerobic-anaerobic treatment system at the Industrial Grain Products Ltd. location is discharged directly to the Kaministiquia River. BOD_5 reductions of 91% in the anaerobic reactor and 96% overall had been achieved.

At Centennial Mills, it was observed that an increased removal efficiency could be achieved by incorporating a sedimentation step into the treatment sequence. An additional

Lorsque des résidus très concentrés subissent un traitement anaérobie, l'effluent conserve une teneur élevée en matières organiques, même si la DCO a subi une diminution importante de 90 p. 100 à 95 p. 100. Si l'on doit déverser un effluent de bonne qualité dans un égout municipal ou dans une voie d'eau naturelle ou si on veut l'utiliser à des fins d'épandage/irrigation, on peut procéder à un traitement aérobie supplémentaire. Cette technique a été utilisée dans plusieurs installations de traitement anaérobie à grande échelle.

L'évaluation du rendement faite à la coopérative Agropur montre qu'il est possible d'éliminer par traitement anaérobie jusqu'à 90 p. 100 de la DCO totale des eaux résiduaires de la laiterie. Deux bassins aérés de traitement final fonctionnant en série et deux bassins de décantation ont servi à traiter l'effluent du système de traitement anaérobie avant que celui-ci ne soit déversé directement dans la rivière Nicolet. L'effluent final résultant du traitement combiné aérobie-anaérobie de l'Industrial Grain Products Ltd. est déversé directement dans la rivière Kaministiquia. On a obtenu une diminution de la DBO_5 de 91 p. 100 dans le réacteur anaérobie, et une diminution globale de 96 p. 100.

Chez Centennial Mills, on a observé une amélioration de l'élimination en incorporant au système une étape de décantation, ce qui a permis d'obtenir une élimination supplémentaire de 10 p. 100 de la DCO. L'installation

10% COD removal was obtained. At the Mid-America Dairyman Inc. facility, an overall treatment efficiency of 96% BOD_5 removal was projected for the treatment system consisting of an anaerobic bulk volume fermentor followed by an aerobic biotower.

At the Millbank Cheese and Butter demonstration study, treated whey from the digestion system was pumped to an earthern storage facility, and periodically spray-irrigated on 12 ha of land. At Hardee Farms Ltd., anaerobic treatment was followed by an aerobic system and secondary clarifier. The final effluent from the complete treatment system, having a COD of 3000 mg/L, was pumped to a 2-ha plantation of willows and hybrid poplars, where further COD reductions occurred. It was concluded that the use of the tree plantation was a cost effective and energy efficient substitute for spray irrigation.

At the G. Heilman Brewery, no aerobic systems are used to improve effluent quality. Anaerobically-treated effluent passes through a well reservoir and surplus sludge tank before entering the municipal sewage line.

Mid-America Dairyman Inc. a prévu une élimination globale de la DBO_5 de 96 p. 100 avec passage des eaux résiduaires dans un digesteur anaérobie à forte charge, puis dans une tour de traitement biologique aérobie.

Une étude effectuée chez Millbank Cheese and Butter consistait à pomper le lactosérum traité dans le digesteur et à l'envoyer dans une installation de stockage enfouie dans le sol et à le pulvériser périodiquement pour irriguer un terrain de 12 ha. Les eaux résiduaires de la Hardee Farms Ltd. ont subi un traitement anaérobie, puis aérobie, et sont passées par un décanteur secondaire. L'effluent final du système de traitement complet, dont la DCO était de 3000 mg/l, était pompé vers un terrain de 2 ha planté de saules et de peupliers hybrides, et on a obtenu une diminution plus poussée de la DCO. On a conclu que l'utilisation de la plantation d'arbres était un moyen rentable, et à faible consommation d'énergie, de remplacer l'irrigation par aspersion.

La G. Heilman Brewery n'a utilisé aucun système aérobie pour améliorer la qualité de ses effluents. Après un traitement anaérobie, l'effluent passe dans un réservoir et dans un bassin où les boues en excès sont retenues, et le surnageant est déversé dans les égouts municipaux.

4.4 Economic Implications

The decision to install an anaerobic treatment facility is taken only after its cost has been compared to that of the alternatives. In order to abide by environmental regulations, the treatment alternatives are usually aerobic processes, or municipal discharge with associated surcharge. In comparison to anaerobic systems, several economic disadvantages have been cited concerning the traditional aerobic treatment systems, such as the trickling filter, the stabilization basin, and the activated sludge process. These include high capital costs, the high energy requirements of aeration, and a high waste sludge production requiring disposal. If an aerated process is used as a polishing step for an anaerobic system, the costs associated with the aerobic system would be reduced since the majority of the COD has been removed anaerobically.

Industries will not have direct control over operating expenses when making surcharge payments to a municipal treatment facility for waste disposal. In addition, established municipal facilities may not be capable of meeting industrial treatment demands, including the increased waste volumes associated with production expansion.

4.4 Conséquences

La décision de construire une installation de traitement anaérobie ne doit être prise qu'après avoir effectué une étude comparative des coûts. En vue de respecter les règlements environnementaux, les autres solutions de traitement consistent généralement à utiliser un procédé aérobie ou à faire traiter l'effluent par une installation municipale, avec les coûts additionnels que cela suppose. Comparativement aux systèmes anaérobies, les systèmes classiques de traitement aérobie, comme le filtre percolateur, le bassin de stabilisation et le procédé de traitement par boues activées comportent plusieurs inconvénients d'ordre économique. Leurs coûts d'investissement sont plus élevés, leur aération consomme beaucoup d'énergie et ils produisent de grandes quantités de boues résiduaires qu'il faut éliminer. L'utilisation d'un procédé d'aération comme étape de traitement final d'un système anaérobie permet de diminuer les coûts entraînés par un système aérobie car la majeure partie de la DCO est alors éliminée par procédé anaérobie.

Les industries n'ont pas de contrôle direct sur leurs dépenses d'exploitation lorsqu'elles effectuent des paiements additionnels à une installation de traitement municipale pour épurer leurs eaux usées. En outre, les installations municipales peuvent être dans l'incapacité de satisfaire à la demande, notamment dans le cas d'une augmentation du volume des eaux usées liée à une augmentation de la production.

At this time, complete cost data from full-scale anaerobic systems is not readily available in the literature. Instead, recent demonstration projects provide an emphasis on design description and operational experience. In general, the detailed economics of an anaerobic facility will depend on a number of site-specific factors including: the digester configuration; waste characteristics; the existing waste collection system; and auxiliary equipment needs.

A number of cost comparison estimates have been developed. Using the computer-aided design package CAPDET[97], and performance criteria based on data from the Wastewater Technology Centre, an economic comparison was constructed for the aerobic versus anaerobic treatment of a hypothetical effluent[1]. The results indicate that anaerobic technology has the potential to generate a surplus over annual O&M costs, compared to the aerobic process which cannot recover its annual O&M expenses. In this comparison, the most significant savings of the anaerobic system are a result of the reduced power and sludge disposal costs. Biogas utilization is the single source of cost recovery. It has also been observed that the economic difference between the aerobic and anaerobic systems is primarily a

Actuellement, il est difficile de trouver dans la documentation des données complètes sur les coûts des systèmes anaérobies à grande échelle. Les récents projets de démonstration insistent plutôt sur la description du modèle et sur l'exploitation. En général, les coûts détaillés liés à une installation anaérobie dépendent d'un certain nombre de facteurs spécifiques, notamment de la configuration du digesteur, des caractéristiques des résidus, du système existant de collecte des résidus et du besoin en matériel auxiliaire de l'entreprise.

Les coûts ont fait l'objet de nombreuses estimations comparées. À l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (Centre de recherche industrielle du Québec)[97] et de critères de rendement tirés des données émanant du Centre technique des eaux usées, on a comparé sur le plan économique le traitement aérobie et le traitement anaérobie d'un effluent hypothétique[1]. D'après les résultats obtenus, le procédé anaérobie est en mesure de produire un surplus de revenus par rapport aux coûts annuels d'exploitation et d'entretien, contrairement au procédé aérobie. Dans cette comparaison, les économies les plus importantes réalisées grâce au procédé anaérobie proviennent de la diminution des coûts énergétiques et d'élimination des boues. L'utilisation du biogaz constitue la seule source de récupération des coûts. On a également observé que la différence de rentabilité entre les procédés aérobie et anaérobie dépend essentiellement des coûts énergétiques. Leur augmentation

function of current energy costs. As energy costs increase, the aerobic-anaerobic cost differential also increases. This point is reiterated by CEDSI Inc.(3), which also prepared a detailed aerobic versus anaerobic energy and cost comparison. A limited number of other cost estimates at specific sites are available(46, 47, 52).

In Canada, the installation of an innovative anaerobic system may be eligible for cost support assistance under Environment Canada's Development and Demonstration of Resources and Energy Conservation Technology (DRECT) program, or (CREDA). Once technologies have been demonstrated; however, the principal form of assistance available is the accelerated capital cost allowance which permits a three year tax write-off of capital equipment for pollution abatement.

accroît nécessairement la différence entre les deux procédés. Ce point a été repris par la CEDSI Inc.(3) qui a également préparé une comparaison détaillée de l'énergie et des coûts nécessités par les procédés anaérobie et aérobie. On dispose d'un certain nombre d'autres estimations des coûts relatifs à des installations spécifiques(46, 47, 52).

Au Canada, l'installation d'un système anaérobie innovateur peut être subventionnée par Environnement Canada, dans le cadre du programme de création et démonstration de techniques de conservation des ressources et de l'énergie (CDTCRE (DRECT)) ou du programme ADEEER (CREDA). Cependant, dès que les techniques ont été éprouvées, la principale aide possible est l'amortissement fiscal accéléré qui permet d'amortir sur trois ans le matériel anti-pollution.

References

1. Hall E.R. and H. Melcer, "Energy Recovery from Wastewater by High Rate Anaerobic Treatment", Water and Pollution Control (March/April, 1984).

2. McKinney, R.E., "Anaerobic Systems vs. Aerobic Systems", Proc. of the 3rd Int. Symposium on Anaerobic Digestion (1983).

3. CEDSI Inc., Potential for Energy Conservation in the Food and Beverage Industries Through Anaerobic Digestion of Wastes to Methane, DSS File No. 14SQ 23380-1-6784-5 (Jan., 1983).

4. Inmarint Ltd., Economic Evolution of Feeding Liquid Whey to Livestock, Part 2 Project, Food Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa (1979).

5. Currie, Coppers & Lybrand Ltd., The Market Potential for Modified Whey and Lactose in Canada (Nov., 1981).

6. Muller, P.G., Economic Evaluation of Feeding Liquid Whey to Livestock, Food Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa (1979).

7. Stanley Associates Engineering Ltd., Biological Treatment of Food Processing Wastewater Design and Operations Manual, Report No. EPS 3-WP-79-7, Environment Canada, Ottawa (1979).

8. Nemerow, N.L., Industrial Water Pollution: Origins, Characteristics and Treatment, Addison-Wesley Publishing Company, Ltd. (1978).

9. Zall, R.R., "Whey Treatment and Utilization" in: Food Processing Waste Management, J.H. Green and A. Kramer (eds.), AVI Publishing Company, Inc., Westport (1979).

10. Switzenbaum, M.S. and S.C. Danskin, "Anaerobic Expanded Bed Treatment of Whey", Agric. Wastes, 4, 411-426 (1982).

11. Wildenauer, F.X. and J. Winter, "Anaerobic Digestion of High Strength Acidic Whey in a pH-Controlled Upflow Fixed-Film Loop Reactor", Appl. Micro. Biotech., 22:367 (1985).

12. Reynolds, P.J. and E. Colleron, "Comparison of Start-up and Operation of Anaerobic Fixed-bed and Hybrid Sludge-bed/Fixed-bed Reactors Treating Whey Wastewater", Proc. EWPCA Conf. Anaerobic Treatment, Amsterdam, p. 515 (1986).

13. Kelly, R.C. and M.S. Switzenbaum, "Temperature and Nutrient Effects on the Anaerobic Expanded Bed Treating a High Strength Waste", Proc. 38th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., Ann Arbor Science (1984).

14. Boening, P.H. and V.H. Larsen, "Anaerobic Fluidized Bed Whey Treatment", Biotech. Bioeng., XXIV:2539 (1982).

15. Li, A.Y. and J.J. Corrado, "Scale-up of the Membrane Anaerobic Reactor System", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. (1985).

16. Li, A., D. Kothari, and J.J. Corrado, "Application of Membrane Anaerobic Reactor System for the Treatment of Industrial Wastewaters", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

17. Sutton, P.M., A. Li, R.R. Evans, and S.R. Korchin, "Dorr-Oliver's Fixed Film Suspended Growth Anaerobic Systems for Industrial Wastewater Treatment and Energy Recovery", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf. (1983).

18. Van den Berg, L. and K.J. Kennedy, "Dairy Waste Treatment with Anaerobic Stationary Fixed Film Reactors", Wat. Sci. Tech., 15, p. 359-368 (1983).

19. Hickey, R.F. and R.W. Owens, "Methane Generation From High Strength Industrial Wastes with the Anaerobic Biological Fluidized Bed", Biotech. Bioeng. Symp. Ser., No. 11:399 (1981).

20. Backman, R.C., F.C. Blanc, and J.C. O'Shaughnessy, "The Treatment of Dairy Wastewater by the Anaerobic Up-flow Packed Bed Reactor", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. (1985).

21. Choi, E. and C.E. Burkhead, "Anaerobic Treatment of Dairy Wastes Using Fixed Film and Without Media Reactors", Proc. of the 39th Ind. Waste. Conf. (1985).

22. Hall, E.R. and G.P. Adams, "Anaerobic Treatment of Cheese Whey", Proc. PCAO/MOE Seminar on Anaerobic Fixed Film Digestion, p. 65-80 (Nov., 1986).

23. Brown, G.J., R.C. Landine, A.L. Steeves, W.A. Bough, D.L. Clarke-Thomas, E. Burk, and R. Eckert, "Anaerobic Treatment of Dairy Wastewater", presented at 58th Annual Conference, WPCF (Oct., 1985).

24. Samson, R., R. Peters, C. Hade, and B. Van den Berg, "Dairy Waste Treatment Using Industrial Scale Fixed Film and Upflow Sludge Bed Anaerobic Digesters: Design and Start-up Experience", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf., Purdue University (1985).

25. Beak Engineering Limited, Anaerobic Treatment of Dairy Effluent, A report for Agropur Coopérative Agro-Alimentaire (Sept., 1985).

26. Canviro Consultants Ltd., Final Report on the Demonstration of Anaerobic Digestion and Energy Recovery at Millbank Cheese and Butter Ltd., Ontario Ministry of Industry and Trade, Toronto (1985).

27. Pette, K.C., R. de Vletter, E. Wind, and W. Van Gills, "Full Scale Anaerobic Treatment of Beet-Sugar Wastewater", Presented at 35th Ind. Waste Conf., Purdue University (1981).

28. Van den Berg, L., C.P. Lentz, D.W. Armstrong, "Anaerobic Waste Treatment Efficiency Comparisons Between Fixed Film Reactors, Contact Digesters, and Fully Mixed, Continuously Fed Digesters", Proc. of the 35th Ind. Waste Conf., Purdue University (1981).

29. Stevens, T.G., L. Van den Berg, "Anaerobic Treatment of Food Processing Wastes Using a Fixed Film Reactor", Proc. of the 36th Ind. Waste Conf., Purdue University (1982).

30. Kennedy, K.J., L. Van den Berg, "Effect of Height on the Performance of Anaerobic Downflow Stationary Fixed-Film Reactors Treating Bean Blanching Waste", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf., Purdue University (1983).

31. Samson, R. and K.J. Kennedy, "Effect of Reactor Height on Mixing Characteristics and Performance of the Anaerobic Downflow Stationary Fixed-Film (DSFF) Reactor", Journal of Biotechnology, 2, 95-106 (1985).

32. Van den Berg, L. and C.P. Lentz, "Comparison Between Up and Downflow Anaerobic Fixed Film Reactors of Varying Surface to Volume Ratios for the Treatment of Bean Blanching Waste", Proc. of the 34th Ind. Waste Conf., Purdue University (1980).

33. Hamoda, M.F. and L. Van den Berg, "Effect of Settling on Performance of the Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactors", Water Research, 18:12 (1984).

34. Jackson, M.L., "Methane Production and Recovery Using Potato Waste Solubles and Solids", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf. (1983).

35. Lin, K.C., R.C. Landine, and S. Bliss, "Temperature Effect on the Anaerobic Treatment of Potato-processing Wastewater", Canadian Journal of Civil Eng. (1982).

36. Landine, R.C., T. Viraraghavan, A.A. Cocci, G.J. Brown, and K.C. Lin, "Anaerobic Fermentation - Filtration of Potato Processing Wastewater", WPCF Journal, 54, No. 1 (Jan., 1982).

37. Landine, R.C., G.J. Brown, A.A. Cocci, and T. Viraraghavan, "Potato Processing Wastewater Treatment at Relatively High Loading Rates Using a Unified Anaerobic Fermenter-Filter", Water Poll. Res. Journal., 17 (1982).

38. Brown, G.J., A.A. Cocci, R.C. Landine, T. Viraraghavan, and K.C. Lin, "Sludge Accumulation in an Anaerobic Lagoon-anaerobic Filter System Treating Potato Processing Wastewater", Proc. of the 35th Ind. Waste Conf. (1981).

39. Lin, K.C. and G.J. Brown, "Treatment of Potato-Processing Wastewater by an Anaerobic Lagoon-Filter System", Canadian Journal of Civil Engineering, 7, 373-383 (1980).

40. Landine, R.C., G.J. Brown, A.A. Cocci, T. Viraraghavan, and K.C. Lin, "Potato Processing Wastewater Treatement Using Horizontal Anaerobic Filters", Can. Inst. Food Sci. Technol. J., 14, No. 2 (1981).

41. Landine, R.C., A.A. Cocci, T. Viraraghavan, and G.J. Brown, "Anaerobic Treatment Key to Pollution Control and Solids Disposal with Energy Recovery For a Food Processor", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf. (1983).

42. Landine, R.C., C.J. DeGarie, A.A. Cocci, A.L. Steeves, G.J. Bown, and T. Viraraghavan, "Anaerobic Pretreatment Facility Also Provides Sludge Disposal Capability and Source of Renewable Energy for Food Processor", Proc. of the 38th Ind. Waste Conf. (1984).

43. Paepke, B.H. and E.R. Hall, Current Research, Development and Demonstration Projects in Anaerobic Methane Fermentation Biotechnology in Canada, Draft report, Energy, Mines and Resources Canada (March, 1985).

44. Joseph Oat Company, Biothane Digest, 2,1 (Winter, 1982).

45. Ainsworth, J.B. and R.T. Taylor, Design of a Geomembrane Floating Cover to Contain Methane Gas for Positive Energy Application, Schlegel Lining Technology, Inc., The Woodlands (1984).

46. Roe, S. F. and S. Love, "Fixed Film Anaerobic Digestion on a Commercial Scale for Potato and Vegetable Wastes", Bio-Energy World Conference (June, 1984).

47. Richter, G.A., J.A. Mackie, CH2M/Hill Engineering Ltd., Low Cost Treatment for High Strength Waste (October, 1971).

48. Taylor, D.W., "Full Scale Anaerobic Trickling Filter Evaluation", Proc. of 3rd National Symposium on Food Processing Wastes, National Environmental Research Center, Office of Research and Monitoring, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-R2-72-018 (Nov., 1972).

49. Bezler, T., P. Sutton, D. Huss, and A. Li, "Fluidized Bed and Membrane-Controlled Processes for Anaerobic Wastewater Treatment", presented at the Scientific Conference of Corn Refiners Association (June, 1984).

50. Sutton, P. and A. Li, "AnitronT and OxitronT Systems: High Rate Anaerobic and Aerobic Biological Treatment Systems for Industry", Proc. of the 36th Ind. Waste Conf., Purdue University (1982).

51. Choate, W.T., D. Houldsworth, and G.A. Butler, "Membrane Enhanced Anaerobic Digesters", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf. (1983).

52. Bonkoski, W.A., J.E. Sointio, and G.R. Gillespie, "Anaerobic-Aerobic Treatment of a Wheat Starch Plant Effluent - A Case History", Proc. of the 38th Ind. Waste Conf., Purdue University (1983).

53. Dearborn Environmental Consulting Services, Evaluation of Physical-Chemical Technologies for Water Reuse, By-Product Recovery, and Wastewater Treatment in the Food Processing Industry, Report EPS 3-WP-79-3, Environment Canada (1979).

54. Stover, E.L., G. Gomathinayagum, and R. Gonzalez, "Use of Methane Gas from Anaerobic Treatment of Stillage for Fuel Alcohol Production", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

55. Lanting, J. and R.L. Gross, "Anaerobic Pretreatment of Corn Ethanol Production Wastewater", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

56. Keenan, J. D. and I. Kormi, "Anaerobic Digestion of Brewery By-products", Journal WPCF, 53, No. 1 (Jan., 1981).

57. Ruppel, W., M. Biedron, and B. Thornton, "Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reduces COD 75-85%, Produces Methane Gas", Food Processing (Sept., 1982).

58. Sax, R. I., "Anaerobic Pretreatment of Brewery Wastewater on the Industrial Scale", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf., Purdue University (1985).

59. Porges, R. and E.J., Struzeski, Jr. "Wastes from the Soft-Drink Bottling Industry", Jour. Water Poll. Fed., 33, 2, 167 (1961).

60. Ghosh, S. and M.P. Henry, "Stabilization and Gasification of Soft-Drink Manufacturing Waste by Conventional and Two-Phase Anaerobic Digestion", Proc. of the 36th Ind. Waste Conf., Purdue University (1982).

61. Sollo, F.W., PHS Pub., 872 (1961).

62. Steffen, A.J. and M. Bedker, Proc. of the 16th Ind. Waste Conf., Purdue University (1961).

63. Canviro Consultants Ltd., Final Report on the Design and Construction of a Mobile Pilot Plant Anaerobic Digestion Facility, ERDAF 34SZ-010-SZ-3-3009, Research Branch, Engineering and Statistical Research Institute, Agriculture Canada (1985).

64. Anderson, D.R. and L.A. Schmid, "Pilot Plant Study of an Anaerobic Filter for Treating Wastes from a Complex Slaughterhouse", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

65. Hurtwig, T.L., "Anaerobic Sludge Digestion of Municipal Wastewater Sludge: Operation and Maintenance", presented at Seminar on Anaerobic Wastewater Treatment and Energy Recovery, Pittsburgh (Nov., 1981).

66. Van den Berg, L. and C.P. Lentz, "Developments in the Design and Operation of Anaerobic Fermenters", Energy from Biomass, Canadian Research and Development Program, National Conf. (1979).

67. Hoban, D.J. and L. Van den Berg, "Effect of Iron on Conversion of Acetic Acid to Methane During Methanogenic Fermentations", J. Appl. Bact. 47, pp. 153-159 (1979).

68. Van den Berg, L., "Effect of Temperature on Growth and Activity of a Methanogenic Culture Utilizing Acetate", Can. J. Microbiol., 23:898-902 (1977).

69. Patel, G.B. and L.A. Roth, "Effect of Sodium Chloride on Growth and Methane Production of Methanogens", Can J. Microbiol., 23:893-897 (1977).

70. Patel, G.B. and L.A. Roth, "Acetic Acid and Hydrogen Metabolism During Coculture of an Acetic Acid Producing Bacterium with Methanogenic Bacteria", Can. J. Microbiol., 24:1007-1010 (1978).

71. Patel, G.B., A.W. Khan, and L.A. Roth, "Optimum Levels of Sulfate and Iron for the Cultivation of Pure Cultures of Methanogens in Synthetic Media", J. Appl. Bact. 45:347-356 (1978).

72. Patel, G.B., L.A. Roth, and G.D. Sprott, "Factors Influencing Filament Length of Methanospirillum hungatii", J. Gen. Microbiol. (1979).

73. Patel, G.B., L.A. Roth, L. Van den Berg, and D.S. Clark, "Characterization of a Strain of Methanospirillum hungatii", Can. J. Microbiol., 22:1404-1410 (1976).

74. Sprott, G.D., R.C. McKellar, K.M. Shaw, J. Giroux, and W.G. Martin. "Properties of Malate Dehydrogenase Isolated from Methanospirillum hungatii", Can. J. Microbiol. 25:192-200 (1979).

75. Sprott, G.D, J.R. Colvin, and R.C. McKellar, "Spheroplasts of Methanospirillum hungatti Formed Upon Treatment with Dithiothreitol", Can. J. Microbiol., 25 (6), pp. 730-738 (1979).

76. Khan, A.W., "Anaerobic degradation of Cellulose by Mixed Culture", Can. J. Microbiol, 23:1700-1705 (1977).

77. Khan, A.W., T.M. Trottier, G.B. Patel, and S.M. Martin, "Nutrient Requirement for the Degradation of Cellulose to Methane by a Mixed Population of Anaerobes", J. Gen. Microbiol. 112: 365-372 (June, 1979).

78. Kennedy, K.J. and L. Van den Berg, "Stability and Performance of Anaerobic Fixed Film Reactors During Hydraulic Overloading at 10-35°C", Water Res., 16, 1391-1398 (1982).

79. Kennedy, K.J. and R.L. Droste, "Start-up of Anaerobic Downflow Stationary Fixed Film (DSFF) Reactors", Biotechnology and Bioengineering, XXVII, 1152-1165 (1985).

80. Murray, W.D. and L. Van den Berg, "Effect of Support Material on the Development of Microbial Fixed Films Converting Acetic Acid to Methane", Journal of Applied Bacteriology, 51, 257-265 (1981).

81. Samson, R., L. Van den Berg, and K.J. Kennedy, "Mixing Characteristics and Startup of Anaerobic Downflow Stationary Fixed Film (DSFF) Reactors", Biotechnology and Bioengineering, 27, No. 1, 10-19 (1985).

82. Van den Berg, L., K.J. Kennedy, and R. Samson, "Anaerobic Downflow Stationary Fixed Film Reactors: Performance Under Steady-State and Non-Steady State Conditions", Wat. Sci. Tech., 17, 89-102 (1985).

83. Van den Berg, L. and K.J. Kennedy, "Effect of Substrate Composition on Methane Production Rates of Downflow Stationary Fixed Film Reactors", Energy from Biomass Wastes VI, Symposium Papers (1982).

84. Kennedy, K.J., M. Muzar, and G.H. Copp, "Stability and Performance of Mesophilic Anaerobic Fixed Film Reactors during Organic Overloading", Biotechnology and Bioengineering, XXVII, 86-93 (1985).

85. Samson, R., L. Van den Berg, and K.J. Kennedy, "Influence of Continuous Versus Channels on Mixing Characteristics and Performance of Anaerobic Downflow Stationary Fixed Film (DSFF) Reactors Before and During Waste Treatment", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf., Purdue University (1985).

86. Pohland, F.G. and Harper, S.R., "Biogas Developments in North America", Proc. of 4th Int. Symposium on Anaerobic Digestion (1985).

87. Rozz, A., "Suspended Growth Anaerobic Treatment Systems", presented at the Seminar on Anaerobic Wastewater Treatment and Energy Recovery, Pittsburg (1981).

88. Oleszkiewcz, J.A., "Suspended Versus Attached Growth Systems - Process Comparison", presented at the Seminar on Anaerobic Wastewater Treatment and Energy Recovery, Pittsburg (1981).

89. Van den Berg, L. and K.J. Kennedy, "Advanced Anaerobic Reactors", Proc. of 3rd Int. Symposium on Anaerobic Digestion (1983).

90. Sutton, P.M. and D. Huss, "Anaerobic Fluidized Bed Biological Treatment: Pilot to Full-Scale Demonstration", presented at Water Pollution Control Federation Meeting, New Orleans (1984).

91. Jeris, J.S., "Industrial Wastewater Treatment Using Anaerobic Fluidized Bed Reactors", Wat. Sci. Tech., 15 (1983).

92. Li, A.Y. and J.J. Corrado, "Scale-Up of the Membrane Anaerobic Reactor System", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf., Purdue University (1985).

93. Li, A., D. Kothari, and J.J. Corrado, "Application of Membrane Anaerobic Reactor System for the Treatment of Industrial Wastewaters", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf., Purdue University (1985).

94. Sutton, P.M., A. Li, R.R. Evans, and S.R. Korchin, "Dorr-Oliver's Fixed-Film, Suspended Growth Anaerobic Systems for Industrial Wastewater Treatment and Energy Recovery", Proc. of the 37th Ind. Waste Conf., Purdue University (1982).

95. Ghosh, S. and D.L. Klass, "Two Phase Anaerobic Digestion", Process Biochemistry (1978).

96. Ghosh, S., J.P. Ombregt, V.H. De Proost, and P. Pipyn, "Methane Production from Industrial Wastes by Two-Phase Anaerobic Digestion", Energy from Biomass and Wastes VI, Symposium Papers (June, 1982).

97. Cote, P.L., "Evaluation de CAPDET", 4th Annual Symposium on Wastewater Treatment (Nov., 1981).

98. Canviro Consultants Ltd., Interim Report - Long-Term Monitoring and Data Base Development for Applied Anaerobic Digestion Technology in Canada, DSS 515Z-23216-5-7097, submitted to Energy, Mines and Resources (1986).

99. Droste, R.L., A. Simpson, and W.A. Sanchez, Potential for Energy Conservation in the Food and Beverage Industries Through Anaerobic Digestion of Wastes to Methane, submitted to Conservation and Renewable Energy Branch, Energy, Mines and Resources (1983).

100. Droste, R.L. and W.A. Sanchez, "Comparison of Wastewater and Process Parameters on Energy Consumption in Aerobic and Alternative Anaerobic Treatment", Proceedings: International Association on Water Pollution Research, Conf. on Energy Savings in Water Pollution Control, Paris (1983).

101. Duncan Lagnese and Associates, Inc., Proceedings: Anaerobic Wastewater and Energy Recovery Seminar (November, 1981).

102. Eaking, D.E., M.A. Clark, and L.K. Inaba, "Renewable Energy Resource Options for the Food-Processing Industry", Solar Energy Research Institute (September, 1981).

103. Fannin, K.F., J.R. Conrad, V.J. Strivastava, D.E. Jerger, and D.P. Chynoweth, "Anaerobic Processes", Journal WPCF, 54, No. 6 (1982).

104. McCarty, P.L., "History and Overview of Anaerobic Digestion", 2nd Int. Symp. on Anaerobic Digestion (1981).

105. Mosey, F.E., "Anaerobic Biological Treatment of Food Industry Waste Waters", Wat. Poll. Control (1981).

106. Stafford, D.A., Anaerobic Digestion of Food Processing Wastes, Institution of Chemical Engineers Symposium Series, Institution of Chemical Engineers (1984).

5 APPLICATION OF ANAEROBIC DIGESTION IN THE PULP AND PAPER INDUSTRIES

5.1 Incentives for Development

Most of the recent North American experience with anaerobic technology has been gleaned from wastewaters of the agricultural and food processing industries. The pulp and paper industry also produces high strength organic wastewaters which may be suitable for anaerobic treatment. Theoretically, the advantages of anaerobic technology which have been realized in the treatment of other wastestreams would also apply to the treatment of pulp and paper effluents.

In comparison to agricultural and food processing applications, anaerobic technology for the pulp and paper industry is not as fully advanced. One of the main reasons for this lag in development is that some wastewaters generated by pulp and paper industries may present technical difficulties for the implementation of anaerobic treatment. The substantial environmental and economic benefits associated with anaerobic treatment, however, are now encouraging researchers to more fully explore and overcome such limitations.

5 APPLICATIONS DE LA DIGESTION ANAÉROBIE À L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS

5.1 Incitatifs au développement

En Amérique du Nord, la plupart des applications de la technologie anaérobie portent sur des eaux usées provenant des industries agricoles et de la transformation des aliments. L'industrie des pâtes et papiers produit elle aussi des eaux usées à forte teneur en matières organiques pouvant être épurées par traitement anaérobie. Théoriquement, les avantages du traitement anaérobie appliqué à d'autres types d'eaux usées peuvent être valables pour les effluents des usines de pâtes et papiers.

L'application de la technologie anaérobie à l'industrie des pâtes et papiers n'est pas aussi avancée que dans le secteur agricole et de la transformation des aliments. L'une des principales raisons en est que certains types d'eaux usées produites par ces industries peuvent occasionner des difficultés techniques de mise en oeuvre des traitements anaérobies. Les importants avantages environnementaux et économiques du traitement anaérobie incitent à présent les chercheurs à approfondir ces études pour surmonter ces obstacles.

5.2 Waste Characteristics

The North American pulp and paper industry uses a wide variety of wood sources and manufacturing technologies. As a result, mill effluent characteristics vary substantially, depending on the process used, the production rate, and the degree of in-plant effluent reduction measures. The typical characteristics of untreated pulp and paper mill effluents are available in the literature, classified according to manufacturing process(1).

In contrast to food processing wastewaters, many pulp and paper effluents will contain compounds which are toxic or inhibitory to the effluent treatment process, and/or to organisms in the receiving waters. Resin acids, plant hormones, chlorinated organics and reduced sulphur compounds have been identified as pulping effluent components which may create operational difficulties in a biological treatment process(2). Anaerobic treatment should not be dismissed as unacceptable on this basis, since research and development activity is moving toward solving such problems. For example, recent information suggests that selected halogenated organics found to be resistant to aerobic degradation may be metabolized under anaerobic conditions(3).

5.2 Caractéristiques des déchets

L'industrie des pâtes et papiers en Amérique du Nord utilise une grande variété d'essences de bois et de techniques de fabrication. Les caractéristiques des effluents des usines varient donc de façon importante selon le procédé utilisé, le taux de production et l'importance des mesures de dépollution des effluents dans l'usine. Les caractéristiques typiques des effluents d'usines de pâtes et papiers non traités sont décrites dans la documentation et classifiées selon les procédés de fabrication(1).

Contrairement aux eaux usées de l'industrie alimentaire, de nombreux effluents des usines de pâtes et papiers contiennent des composés qui nuisent au processus de traitement des effluents, l'inhibent et(ou) empoisonnent les organismes des eaux réceptrices. Des acides résineux, des hormones de plantes, des composés soufrés et agents réducteurs sont des éléments des effluents qui peuvent entraver le processus de traitement biologique(2). Il faut se garder de conclure de ces résultats que le traitement anaérobie est inapplicable, étant donné que la recherche et le développement visent actuellement à résoudre ces problèmes. Par exemple, d'après des données récentes, certains composés organiques halogénés, résistants à la dégradation aérobie, pourraient être métabolisés dans des conditions anaérobies(3).

A high COD/BOD ratio is typical of pulping effluents. When treated either aerobically or anaerobically, even complete BOD removal will leave a non-biodegradable COD residual. As a result of this typical pulping effluent characteristic, anaerobic treatment will likely be used as a pre- or post-treatment process in conjunction with additional physical/chemical operations to upgrade effluent quality.

Throughout the world, a number of laboratory and pilot scale studies have been conducted to determine the anaerobic treatability of a wide variety of pulp mill effluents. The wastestreams which have been studied include: kraft condensates[4-6] and kraft bleachery effluent[7, 8]; peroxide bleachery waste and paper machine effluent[9]; sulphite evaporator condensates[10-19]; chemithermomechanical (CTMP) pulp mill effluent[20, 21]; chemical[22], semi-chemical[23] and pulp mill effluent; thermomechanical (TMP) pulp mill effluent[24]; bark landfill leachates[25]; and ozonated pulp mill effluent[26].

In Canada, a screening program of pulp mill effluents was recently conducted in order to provide information for the establishment of development priorities[2]. The program

Les effluents des usines de pâtes ont habituellement un rapport DCO/DBO élevé. Après un traitement aérobie ou anaérobie, même l'élimination complète de la DBO laisse une DCO résiduelle qui ne peut pas être éliminée par biodégradation. Cette caractéristique propre aux effluents des usines de pâtes fait qu'il est probable qu'un traitement anaérobie soit appliqué avant ou après le traitement, conjointement à des traitements physiques ou chimiques supplémentaires destinés à améliorer la qualité de l'effluent.

Dans le monde entier, un certain nombre d'études en laboratoire et à l'échelle pilote ont été effectuées afin de déterminer les possibilités de traitement anaérobie d'une grande variété d'effluents d'usines de pâte. Parmi les types d'eaux usées qui ont été étudiés, citons: les condensats kraft[4 à 6] et les effluents de blanchiment kraft[7, 8]; les effluents de blanchiment au peroyxde et effluents de machines à papier[9]; les condensats d'évaporateurs (procédé au sulfite)[10 à 19]; les effluents d'usines de pâtes thermomécano-chimiques (PTMC)[20, 21], chimiques[22] et mi-chimiques[23]; les effluents d'usines de pâtes thermomécaniques (PTM)[24]; les eaux de lessivage de décharges contrôlées d'écorces[25] et les effluents ozonisés d'usines de pâtes[26].

Au Canada, un programme de tamisage des effluents des usines de pâtes a été mis en oeuvre récemment pour obtenir des informations devant permettre de fixer des priorités de développement[2]. Ce programme porte sur

involved the chemical characterization of 42 pulp and paper wastestreams selected from kraft, sulphite, mechanical and miscellaneous pulping mills. Conventional methods, as well as biological testing using an anaerobic serum bottle technique[27, 28] were used to classify the suitability of the wastewaters for anaerobic treatment. The results indicated that 55% of the effluents tested were suitable for anaerobic treatment, with COD removal efficiencies ranging from 25 to 95%[29]. In some wastewaters from sulphite and mechanical pulping mills, non-biological COD removal and sulphite reduction are expected to reduce the amount of methane produced during anaerobic treatment.

5.3 Status of Developmental Activity

As a reflection of the rising worldwide interest in the anaerobic treatment of pulp and paper effluents, the First International Association on Water Pollution Control and Research (IAWPRC) Symposium focussing solely on this subject was held in 1985[30]. Significant progress in the anaerobic treatment of pulping effluents is evident, with several full-scale treatment plants operating in Finland[31-33], Sweden[34, 35], Japan[18, 36, 37], Spain[38, 39], and the Netherlands.

la caractérisation chimique de 42 effluents d'eaux usées d'usines de pâtes et papiers provenant de certaines usines de pâtes kraft, au sulfite, mécaniques et autres types. Des méthodes classiques ainsi que des essais biologiques basés sur une technique anaérobie d'ampoules de sérum[27, 28] ont servi à classer ces eaux usées selon leur potentiel de traitement anaérobie. Les résultats ont indiqué que 55 p. 100 des effluents soumis aux essais pouvaient être traités et que l'efficacité d'élimination de la DCO était comprise entre 25 p. 100 et 95 p. 100[29]. Dans le cas de certaines eaux usées provenant d'usines de pâtes au sulfite ou mécaniques, on s'attend à ce que l'élimination non biologique de la DCO et la réduction du sulfite diminuent la quantité de méthane produite pendant le traitement anaérobie.

5.3 Situation actuelle du développement

Par suite de l'intérêt mondial croissant pour le traitement anaérobie des effluents des usines de pâtes et papiers, le premier symposium de l'International Association on Water Pollution Control and Research (IAWPRC), qui portait uniquement sur ce sujet, a eu lieu en 1985[30]. Il est évident que le traitement anaérobie des effluents des usines de pâtes s'est perfectionné, maintenant que plusieurs usines de traitement à grande échelle sont exploitées en Finlande[31 à 33], en Suède[34, 35], au Japon[18, 36, 37], en Espagne[38, 39] et aux Pays-Bas. D'autres

Other full-scale systems have been proposed for start-up in West Germany, France, and Austria[40]. Further comments concerning full-scale treatment plants under development are also available[31, 42].

In North America, there is currently only one full-scale anaerobic installation in operation in the paper industry. At the Inland Container board mill in Newport, Indiana, the wastewater treatment facilities were converted to anaerobic/aerobic lagoons in 1979[43, 44]. This action was taken in order to accommodate the increased BOD discharged to the river resulting from an increase in production. Although no full-scale systems are currently operating in Canada, a number of projects have been initiated to assist in the implementation of energy-efficient high rate anaerobic technology in the pulp and paper industry[45].

MacMillan Bloedel Ltd. operates two mills in Sturgeon Falls, Ontario which produce neutral sulphite semi-chemical pulp (NSSC) corrugating medium and exterior hardboard siding. To initiate a research program, a bench-scale study[46], and a preliminary assessment of the six major plant sewer effluents at Sturgeon Falls were carried out. The results indicated that all in plant wastestreams were suited

systèmes à grande échelle devraient être mis en oeuvre en RFA, en France et en Autriche[40]. D'autres commentaires sur les usines de traitement à grande échelle en cours de développement sont également disponibles[31, 42].

En Amérique du Nord, l'industrie papetière ne compte qu'une seule installation de traitement anaérobie à grande échelle. À l'usine de carton Inland Container de Newport (Indiana), les installations de traitement des eaux usées ont été converties en étangs anaérobie-aérobie en 1979[43, 44] en vue de réduire la DBO des effluents déversés dans la rivière par suite de l'augmentation de la production. Bien qu'aucun système à grande échelle ne soit présentement exploité au Canada, un certain nombre de projets ont été lancés pour faciliter le développement, dans l'industrie des pâtes et papiers, de techniques de traitement anaérobies très efficaces du point de vue énergétique[45].

MacMillan Bloedel Ltd. exploite deux usines à Sturgeon Falls (Ontario) qui produisent de la pâte mi-chimique au sulfite neutre (MCSN) pour la fabrication de carton ondulé et de parement extérieur. Pour mettre sur pied un programme de recherche, on a effectué une étude en laboratoire[46], ainsi qu'une évaluation préliminaire de six effluents d'eaux usées de grandes usines à Sturgeon Falls. Les résultats ont indiqué que tous les effluents d'eaux usées des usines pouvaient

to anaerobic treatment, although some inhibition was associated with the NSSC spent liquor stream. Subsequently, the evaluation of five different pilot scale reactors identified several successful technical alternatives for demonstration at the mill[47]. The demonstration plant, consisting of a 20 m^3 UASB reactor, with facilities for pre-acidification and nutrient addition, is currently undergoing a 12-month evaluation program.

In 1985, a treatability study was undertaken by the Wastewater Technology Center (WTC) in Burlington, Ontario to assess the effectiveness of anaerobic technology as a pretreatment step for the alternating Thermomechanical Pulping/Chemi-thermomechanical Pulping (TMP/CTMP) wastewaters of Quesnel River Pulp Co. Aerobic systems are not well suited to the treatment of concentrated TMP/CTMP effluents. In addition, the problems of effluent treatment are further aggravated by the switching between TMP and CTMP processing. In the future, the number of mills using TMP/CTMP pulping is expected to increase. A review of the WTC data recommended further development work on the anaerobic treatment of alternating TMP/CTMP wastewaters at Quesnel River[48]. A

être traités par procédé anaérobie, malgré une certaine inhibition due à la teneur en liqueur épuisée MCSN de l'effluent. Par la suite, l'évaluation de cinq réacteurs différents à l'échelle pilote a permis de trouver plusieurs solutions techniques possibles pouvant servir à une démonstration en usine[47]. L'installation de démonstration, constituée par un réacteur anaérobie à lit de boues à courant ascendant, est pourvue de dispositifs de pré-acidification et d'addition d'éléments nutritifs et fait actuellement l'objet d'un programme d'évaluation de douze mois.

En 1985, le Centre technique des eaux usées (CTEU) de Burlington, en Ontario, a entrepris une étude visant à déterminer l'efficacité de la technique de pré-traitement anaérobie des eaux usées provenant alternativement de la fabrication de pâte thermomécanique et de pâte thermomécano-chimique (PTM/PTMC) de la Quesnel River Pulp Co. Les systèmes aérobies ne sont pas très efficaces pour le traitement d'effluents de PTM/PTMC. De plus, le problème du traitement des effluents est aggravé par l'alternance des traitements PTM et PTMC. On s'attend à ce que le nombre des usines de type PTM/PTMC augmente. Une étude des données du CTEU recommande d'autres travaux de développement du traitement anaérobie en alternance des eaux usées de PTM/PTMC à Quesnel River[48]. Une étude pilote du traitement des eaux usées de PTM/PTMC à Quesnel River devrait être entreprise prochainement.

pilot study of TMP/CTMP wastewater treatment at Quesnel River is expected.

At Consolidated Bathurst Inc. (CBI), New Brunswick, preliminary small-scale pilot studies and economic evaluations were conducted to assess the various wastewater treatment options for this mill[49]. In a more comprehensive pilot program to select the type of anaerobic process for full-scale application, three different anaerobic processes are being evaluated[50]. The systems chosen for study include a contact reactor, an upflow anaerobic sludge blanket reactor, and a two-stage fluidized bed process.

In September 1986, a six-month pilot study was initiated at Papier Cascades Inc., a sodium base semi-chemical mill located in Cabano, Quebec. The demonstration plant uses a UASB reactor, with a Sweco screen for solids removal, and a small preacidification tank[40]. Final results are not yet available.

The program at the Pulp and Paper Institute of Canada (PAPRICAN) to develop anaerobic treatment technology has been successful in producing a nontoxic effluent using only anaerobic treatment of newsprint mill effluents. The work is currently being extended to pilot scale at Spruce Falls Power and

À la Consolidated Bathurst Inc. (CBI), au Nouveau-Brunswick, des études préliminaires à l'échelle pilote et des prévisions économiques ont été effectuées en vue d'évaluer les diverses possibilités de traitement des eaux usées de cette usine[49]. Dans le cadre d'un programme pilote plus global destiné à sélectionner le type de traitement anaérobie qui doit être appliqué à grande échelle, on évalue trois différents procédés[50]. Les systèmes choisis pour l'étude comprennent un réacteur de contact, un réacteur anaérobie à lit de boues à courant ascendant et un procédé à lit fluidisé à deux étages.

En septembre 1986, une étude pilote de six mois a été entreprise à Papier Cascades Inc., une usine à procédé mi-chimique à base de sodium située à Cabano, au Québec. L'usine de démonstration utilise un réacteur RALBCA, pourvu d'un tamis Sweco pour l'élimination des matières solides, ainsi que d'un petit réservoir de pré-acidification[40]. Les résultats finals ne sont pas encore disponibles.

Le programme en cours à l'Institut des pâtes et papiers du Canada (IPPC) visant à élaborer une technologie de traitement anaérobie a réussi à produire un effluent non toxique par traitement anaérobie des effluents d'une usine de papier journal. La Spruce Falls Power and Paper à Kapuskasing, en Ontario, se prépare actuellement à passer à l'échelle pilote. Un projet de passage de l'échelle pilote

Paper (Kapuskasing, Ontario). A pilot-to-full-scale project is also underway at Lake Utopia's NSSC mill in New Brunswick.

5.4 Identified Research Requirements

Due to the level of development activity concerning the anaerobic treatment of pulp and paper effluents, further research in this field is justified. According to the results in the literature review [42], particular attention should be directed toward the ability of anaerobic digestion to decrease the retention time and increase the methane yield when treating high strength pulp mill effluent. An effort should be made to extend the range of digestible materials to include lignin and/or its degradation products.

Some specific research requirements have also been identified, including the need for improved chemical characterization of pulp and paper wastewaters and anaerobically treated effluents. This information would help direct the development of anaerobic technology towards the applications with the greatest economic potential and environmental demand. Design parameters should be developed for the reduction of toxicity due to chlorinated organics (bleach plants), resin

à la grande échelle est également en cours à l'usine de pâte MCSN de Lake Utopia, au Nouveau-Brunswick.

5.4 Conditions de recherche

Le traitement anaérobie des effluents des usines de pâtes et papiers est l'objet de nombreuses recherches, et des études supplémentaires sont nécessaires dans ce domaine. Selon les résultats tirés de l'étude de la documentation[42], il faut s'intéresser plus particulièrement au potentiel qu'ont les procédés de digestion anaérobie de diminuer le temps de rétention et d'augmenter le rendement en méthane lors du traitement d'effluents concentrés d'usines à papiers. Il faut également chercher à accroître la gamme des matériaux digestibles de façon à inclure la lignine et(ou) ses produits de dégradation.

Certaines exigences particulières de recherche ont également été identifiées, y compris la nécessité d'une étude poussée des caractéristiques chimiques des eaux usées des usines de pâtes et papiers, ainsi que des effluents ayant subi un traitement anaérobie. Ces informations permettraient d'orienter le développement de la technique anaérobie vers des applications à plus grand potentiel économique et répondant à des exigences environnementales plus importantes. Il faut élaborer des paramètres de conception pour réduire la toxicité causée par les produits organiques

acids (pulping effluents), and ammonium and sulphide (anaerobic effluents). In this respect, an improved understanding and control of sulphate/sulphite reduction in anaerobic processes is also needed to overcome the technical difficulties arising from specific pulp and paper effluent characteristics. Improved data on costs should be made available, with the need for specific comparisons between combined anaerobic-aerobic systems and an aerobic treatment system alone. In addition to economic implications, the degree of BOD removal and toxicity reduction capabilities should also be examined.

chlorés (installations de blanchiment), les acides résiniques (effluents de réduction en pâte), ainsi que par l'ammonium et le sulfure (effluents des traitements anaérobies). À cette fin, une meilleure compréhension et un meilleur contrôle de la réduction sulfate-sulfite qui se produit au cours du processus anaérobie sont également nécessaires pour surmonter les difficultés techniques inhérentes aux caractéristiques particulières des effluents des usines de pâtes et papiers. Il faudrait également disposer de meilleures données sur les coûts, ainsi que de comparaisons particulières entre les systèmes aérobies-anaérobies combinés et les systèmes aérobies simples. En plus des considérations économiques, il faut aussi examiner le degré d'élimination de la DBO et le potentiel de réduction de la toxicité.

References

1. McCubbin, N., The Basic Technology of the Pulp and Paper Industry and its Environmental Protection Practices, Environment Canada, EPS 6-EP-83-1 (Oct., 1983).

2. Hall, E.R., Development of Anaerobic Treatment Technology for Pulp and Paper Wastewaters, Environment Canada, Wastewater Technology Centre, Burlington (Nov., 1984).

3. Bouwer, E.J., B.E. Rittmann, and P.L. McCarty, "Anaerobic degradation of halogenated 1- and 2- carbon organic compounds", Env. Sci. Technol., 15, 596 (1981).

4. Norrman, J., "Anaerobic Treatment of a Black Liquor Evaporator Condensate from a Kraft Pulp Mill in Three Types of Fixed-Film Reactors", Wat. Sci. Tech., 15, 247 (1983).

5. ADI Limited, BOD and TRS Removal from Kraft Foul Condensates Using Anaerobic Treatment System, DSS 52SSKE/45-3-0035 (March, 1984).

6. Carpenter, W. L. and H. F. Berger, "A Laboratory Investigation of the Applicability of Anaerobic Treatment to Selected Pulp Mill Effluents", TAPPI Environmental Conference (1984).

7. Hakulinen, R., M.S. Salkinoja-Salonen, and M.L. Saxelin, "Purification of Kraft Bleach Effluent by an Anaerobic Fluidized Bed Reactor and Aerobic Trickling Filter at Semitechnical Scale (ENSO Fenox)", TAPPI Environmental Conference (1981).

8. Scroggins, R.P., "In-Plant Toxicity Balances for a Bleached Kraft Pulp Mill", Pulp and Paper Canada, 87(9) (1986).

9. Cocci, A.A., R.C. Landine, G.J. Brown, and A.M. Tennier, "Pilot Scale Anaerobic Treatment of Peroxide Bleachery Waste, Paper Machine Effluent and Waste Activated Sludge", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

10. Nitchals, D.R., M.M. Benjamin, and J.F. Ferguson, "Anaerobic Treatment of Caustic Extraction Waste with Sulfite Evaporator Condensate", Pulping Conf., TAPPI (1983).

11. Nitchals, D.R., M.M. Benjamin, and J.F. Ferguson, "Combined Anaerobic Treatment of Two Waste Streams from the Sulfite Pulping Process", J. Wat. Pollut. Control. Fed., 57, 253 (1985).

12. T.W. Beak Consultants Ltd., "Anaerobic Contact Filter for Treatment of Waste Sulphite Liquor", CPAR Project Report 103-1, Env. Can. (1973).

13. Benjamin, M.M., J.F. Ferguson, M.E. Baggins, "Treatment of Sulphite Evaporator Condensate with an Anaerobic Reactor", TAPPI, 65, No. 8 (96-103) (Aug., 1982).

14. Benjamin, M.M., S.L. Woods, and J.F. Ferguson, "Anaerobic Toxicity and Biodegradability of Pulp Mill Waste Constituents", Water Res., 18, No. 5 (601-607) (1984).

15. Maxham, J.V. and G.A. Dubey, "Treatment of a Sulphite Pulp Mill Evaporator Condensate Using Anaerobic and Aerobic Biological Treatment Technologies", TAPPI Environmental Conference (1984).

16. Berg, J.A. and L.J. Eder, "Anaerobic Digestion of Evaporator Condensate- A Major Cost Savings Potential", TAPPI Environmental Conference (1984).

17. Donovan, E.J., D.A. Krysinski, and K. Subburamu, "Anaerobic Treatment of Sulphite Liquor Evaporator Condensate", TAPPI Environmental Conf. (1984).

18. Takeshita, N., E. Fujimura, and N. Mimoto, "Energy Recovery by Methane Fermentation of Pulp Wastewater and Sludges", Pulp Paper Can., 82 (5), T171 (1981).

19. Frostell, B., "Anaerobic-Aerobic Pilot Scale Treatment of a Sulphite Evaporator Condensate", Pulp Paper Can., 85(3), T57 (1984).

20. Welander, T. and P.E. Andersson, "Anaerobic Treatment of Wastewater From the Production of Chemithermomechanical Pulp", Wat. Sci. Tech., 17 (1985).

21. Andersson, P.E., L. Gunnarsson, G. Olsson, T. Welander, and A. Wikstrom, "Anaerobic Treatment of CTMP Effluent", Proc. 1985 Envir. Conf., Can. Pulp and Paper Assoc. (1985).

22. Salkinoja-Salonen, M., J. Apujalahti, L. Silakoski, and R. Hakulinen, "Anaerobic Fluidized Bed for the Purification of Effluents from Chemical and Mechanical Pulping", Biotech. Adv., 2 (1984).

23. Cocci, A.A. et al., "Anaerobic Fermentation of a Semi-Chemical Pulp Mill Effluent", TAPPI 1982 International Sulfite Pulping Conference, 253-256 (1983).

24. Jurgensen, S.L., M.M. Benjamin, and J.F. Ferguson, "Treatability of Thermomechanical Pulping Process Effluents with Anaerobic Biological Reactors", Proc. TAPPI Environmental Conference, 83 (1985).

25. Ryden, S. and P. Hagland, "Control of Bark Landfill Leachates by Means of an Anaerobic Treatment System", TAPPI Environmental Conference (1981).

26. Bremman, C.E., M.F. Jurgensen, and J.T. Patton, "Methane Production from Ozonated Pulp Mill Effluent" J. Environ. Qual., 9, No. 3 (1980).

27. Cornacchio, L.A., E.R. Hall, and J.T. Trevors, "Anaerobic Biodegradation Estimates for Industrial Wastewaters", for presentation at 21st Can. Symp. Wat. Poll. Res. (April, 1986).

28. Cornacchio, L.A., E.R. Hall, and J.T. Trevors, "Modified Serum Bottle Testing Procedures For Industrial Wastewaters", Proc. Tech. Transfer Workshop on Laboratory Scale Anaerobic Treatability Testing Techniques, Environment Canada, WTC (Nov., 1986).

29. Hall, E.R. and L.A. Cornacchio, "Anaerobic Treatability Testing of Canadian Pulp and Paper Mill Wastewaters", 73rd Annual Meeting, Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association, Preprints "B" (Jan. ,1987).

30. Rantala, P. and A. Luousi (eds.), "Anaerobic Treatment of Forest Industry Wastewaters : Proc. of IAWPRC Symposium", Wat. Sci. Tech., 17, Pergamon Press (1985).

31. Rekunen, S. et al., "Taman Anaerobic Process for Wastewater of Groundwood Plant and Paper Manufacturing Mill", Proc. IAWPRC Symposium on Forest Industry Wastewater (June, 1984).

32. Hakulinen, R., Paperi ja Pau, 5,341 (1982).

33. Rekunen, S., "Anaerobic Wastewater Treatment System Operates at Very Low Cost", Pulp and Paper (May, 1985).

34. Karlsson, S.R.L., "First Experience from the Anaerobic Treatment of Pulp and Paper Mill Effluents at Hylte Bruk", 1984 SPCI, Conf. (April, 1984).

35. Frostell, B., W. Bonkoski, and J.E. Sointo, "Full Scale Anaerobic Treatment of a Pulp and Paper Industry Wastewater", Proc. of the 39th Ind. Waste Conf. (1985).

36. Nihei, H., Japan TAPPI, 37 (6), 475 (1983).

37. Endo, G. and Y. Tohya, "Anaerobic Biological Decomposition of Malodorous Compounds in Kraft Pulping Wastewater", First IAWPRC Symp. Forest Industry Wastewaters (June, 1984).

38. Velasco, A.A., E. Sarner, and W.A. Bonkoski, "Full Scale Anaerobic-Aerobic Biological Treatment of a Semichemical Pulping Wastewater", TAPPI Environmental Conference (1986).

39. Velasco, A.A., B. Frostell, and M. Greene, "Full Scale Anaerobic-Aerobic Biological Treatment of a Semichemical Pulping Wastewater", Proc. of the 40th Ind. Waste Conf. (1985).

40. Maat, D.Z. and L.A. Habets, "Anaerobic Treatment of Pulp and Paper Effluents'" 73rd Annual Meeting, Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association, Preprints "B" (Jan., 1987).

41. Dorica, J., Report on the First IAWPRC Symposium on Forest Industry Wastewaters: Anaerobic Treatment of Forest Industry Wastewaters, Conference Report No. 36, PAPRICAN (Pulp and Paper Research Institute of Canada) (Nov., 1984).

42. Dorica, J., The Application of Anaerobic Treatment Technology to Pulp Mill Effluents and Sludges - A Literature Review, Miscellaneous Report No. 65, PAPRICAN (Jan., 1985).

43. Priest, C.J., "A Change to Anaerobic-Aerobic Treatment Made Expanded Production Possible Without Expansion of Wastewater Treatment Facilities", Proc. of the 35th Ind. Waste Conf., Purdue University (1981).

44. Priest, C.J., Pulp Environmental Conference, Pulp and Paper, 4 (57), 125 (April, 1986).

45. Hall, E.R., Anaerobic Treatment of Pulp and Paper Wastewaters, Program Status Report, Environment Canada, Wastewater Technology Centre (April, 1986).

46. Cocci, A.A., G.J. Brown, R.C. Landine, and C.F. Prong "Anaerobic-aerobic Treatment of NSSC Pulp Mill Effluent - A Major Biogas Energy and Pollution Abatement Method", Pulp and Paper Canada, 86:2 (1985).

47. Hall, E.R., C.F. Prong, P.D. Robson, and A.J. Chnelauskas, "Evaluation of Anaerobic Treatment for NSSC Wastewater", TAPPI Environmental Conference (April, 1986).

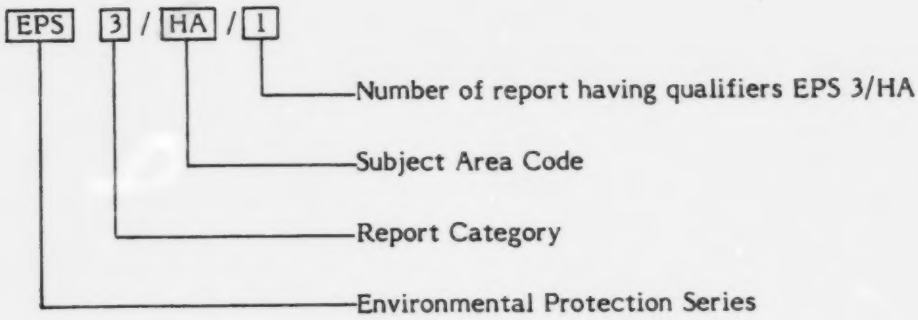
48. Beak Consultants Limited, Anaerobic Treatment of TMP/CTMP Wastewater, prepared for Environment Canada, Wastewater Technology Centre (Sept., 1986).

49. Wilson, R.W., K.L. Murphy, and E.G. Frenette "Aerobic and Anaerobic Treatment of NSSC and CTMP Effluent" 1985 CPPA Environmental Conf. (Sept., 1985).

50. Schneider, E., R.W. Wilson, and E.G. Frenette, "Anaerobic Pilot Plant Experience at Consolidated Bathurst Inc., Bathurst, N.B. Mill", 73rd Annual meeting, Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association, Preprints B (Jan., 1987).

ENVIRONMENTAL PROTECTION SERIES REPORTS

Sample Number:



Categories

1 Regulations/Guidelines/Codes of Practice
2 Public Consultation: Problem Assessment, Control Options
3 Research and Technology Development
4 Literature Reviews
5 Surveys
6 Social, Economic and Environmental Impact Assessments
7 Surveillance
8 Policy Proposals & Statements
9 Manuals

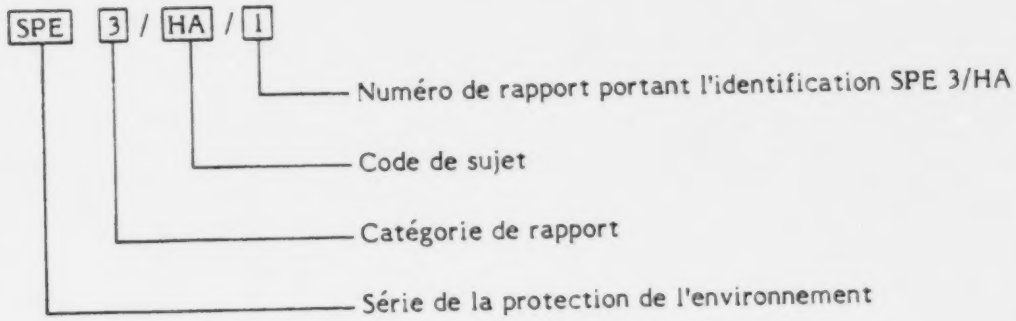
Subject Areas

AG Agriculture
AN Anaerobic Technology
AP Airborne Pollutants
AT Aquatic Toxicity
CC Commercial Chemicals
CE Consumers and the Environment
CI Chemical Industries
FA Federal Activities
FP Food Processing
HA Hazardous Wastes
IC Inorganic Chemicals
MA Marine Pollution
MM Mining & Ore Processing
NR Northern & Rural Regions
PF Paper and Fibres
PG Power Generation
PN Petroleum and Natural Gas
SF Surface Finishing
SP Oil & Chemical Spills
SRM Standard Reference Methods
TS Transportation Systems
UP Urban Pollution
WP Wood Protection/Preservation

New subject areas and codes are introduced as they become necessary. A list of EPS reports may be obtained from Environmental Protection Publications, Conservation and Protection, Environment Canada, Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0H3.

SÉRIE DE RAPPORTS DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotage:



Catégories

1	Règlements/Lignes directrices/ Codes de procédure
2	Consultation publique: évaluation des problèmes, options de contrôle
3	Recherche et développement technologique
4	Revues de la documentation
5	Relevés
6	Évaluations des impacts sur l'environnement
7	Surveillance
8	Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9	Guides

Sujets

AG	Agriculture
AN	Technologie anaérobie
AP	Polluants atmosphériques
AT	Toxicité aquatique
CC	Produits chimiques commerciaux
CE	Consommateurs et l'environnement
CI	Industries chimiques
FA	Activités fédérales
FP	Traitement des aliments
HA	Déchets dangereux
IC	Chimie inorganique
MA	Pollution marine
MM	Exploitation minière et traitement des minéraux
NR	Régions du Nord et rurales
PF	Papier et fibres
PG	Production de l'électricité
PN	Pétrole et gaz naturel
SF	Traitement de surface
SP	Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM	Méthode de référence normalisée
TS	Systèmes de transport
UP	Pollution urbaine
WP	Protection/préservation du bois

Sujets et codes additionels sont introduits au besoin. Une liste de rapports du SPE peut être obtenue en s'adressant aux Publications de la protection de l'environnement, Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3.